

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА імені О. М. Бекетова

М. В. ХВОРОСТ
С. А. КАЛКАМАНОВ
С. А. ГРЯЗНОВА

**МОДЕЛІ ВЗАЄМОДІЇ РУХОМОГО СКЛАДУ МЕТРОПОЛІТЕНУ З
ПОВІТРЯНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ ТА БЕЗПЕКА НА ТРАНСПОРТІ**

Монографія

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2017

УДК 621.337:629.015:331.47

ББК 39.81+51.245

X32

Автори:

Хворост Микола Васильович, доктор технічних наук, професор;
Калкаманов Салим Аюпович, доктор технічних наук, професор;
Грязнова Світлана Аркадіївна, кандидат технічних наук, доцент

Рецензенти:

Ворожбіян Михайло Іванович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри охорони праці та навколишнього середовища Українського державного університету залізничного транспорту;

Далека Василь Хомич, доктор технічних наук, професор кафедри електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова;

Нефьодов Леонід Іванович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації і комп'ютерно-інтегрованих технологій Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

*Рекомендовано вченою радою Харківського національного університету
міського господарства імені О. М. Бекетова,
протокол № 4 від 28 листопада 2014 року*

Хворост М. В.

X32 Моделі взаємодії рухомого складу метрополітену з повітряним середовищем та безпека на транспорті: монографія / М. В. Хворост, С. А. Калкаманов, С. А. Грязнова; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 107 с.
ISBN 978-966-695-410-0

Робота присвячена проблемі моделювання процесів взаємодії рухомого складу з повітряним середовищем із огляду безпеки на транспорті. В монографії розглянуто заходи щодо покращення техніко-економічних показників, санітарно-гігієнічних умов, пожежної безпеки на поїздах у тунелі, а також визначено шляхи підвищення ефективності вентиляції в тунелях, зменшення шуму, динамічних навантажень на панелі та інші елементи стін тунелів. З метою підвищення безпеки на транспорті результати теоретичних досліджень доцільно використовувати під час визначення оптимальних програм руху рухомого складу, беручи до уваги неоднорідності повітряного середовища.

УДК 621.337:629.015:331.47
ББК 39.81+51.245

ISBN 978-966-695-410-0

© М. В. Хворост, С. А. Калкаманов,
С. А. Грязнова, 2017
© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017

Зміст

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП	8
1 БАЗОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РУХОМОГО СКЛАДУ В ТУНЕЛІ...	10
1.1 Техніко-експлуатаційні характеристики рухомого складу.....	10
1.2 Вплив збурень повітряного середовища на базові характеристики рухомого складу.....	13
1.2.1 Утворення неоднорідності повітряного середовища.....	13
1.2.2 Вплив збурень повітряного середовища на санітарно- гігієнічні умови.....	15
1.2.3 Гарантування пожежної безпеки рухомого складу.....	19
1.2.4 Вплив повітряного опору на кінематичні й геометричні характеристики поїздів.....	24
2 ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	31
2.1 Аналіз методів визначення характеристик рухомого складу з урахуванням неоднорідності повітряного середовища.....	31
2.2 Модель взаємодії рухомого складу та елементів споруд тунелю з повітряним середовищем.....	34
2.3 Визначення мети дослідження.....	36
3 МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПОВІТРЯНОГО ОПОРУ ПОЇЗДІВ У ТУНЕЛІ З УРАХУВАННЯМ ЗБУРЕННЯ ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА.....	40
3.1 Метод визначення повітряного опору транспортних засобів.....	40
3.1.1 Базові рівняння.....	42
3.1.2 Урахування циркуляційних потоків.....	44
3.1.3 Урахування місцевих гідравлічних опертів.....	45
3.1.4 Урахування нестационарних особливостей руху повітряної маси.....	47
3.2 Обґрунтування достовірності.....	50

4 ВПЛИВ НЕОДНОРІДНОСТІ ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА НА ТЯГОВЕ РОЗРАХУВАННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ В ТУНЕЛІ.....	53
4.1 Тягові характеристики рухомого складу.....	53
4.2 Метод тягового розрахування рухомого складу з урахуванням неоднорідності повітряного середовища.....	56
4.3 Автоматизація процесів управління рухом електропоїздів.....	61
4.4 Результати дослідження впливу неоднорідності повітряного середовища на тягові характеристики рухомого складу Харківського метрополітену.....	65
5 МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОГРАМ РУХУ ПОЇЗДІВ У ТУНЕЛІ.....	68
5.1 Енергетичні характеристики рухомого складу.....	68
5.2 Базові завдання для розрахування енергетичних характеристик рухомого складу.....	75
5.3 Граничні можливості метрополітену як транспортної системи з урахуванням впливу неоднорідності повітряного середовища.....	82
5.4 Оптимізація програм руху рухомого складу з урахуванням неоднорідності повітряного середовища.....	86
5.5 Практичні рекомендації щодо зменшення негативного впливу обурень повітряного середовища під час побудови алгоритмів для поїздів у тунелі.....	98
ВИСНОВКИ.....	103
Список використаних джерел.....	105

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

Умовні позначення:

E_n – витрата електроенергії на перегонах $1, 2, \dots, n$;

A_j – витрата енергії потягом на j -ому перегоні;

$\Gamma_{бр}$ – виконаний об'єм робіт;

$\Gamma_{пас}$ – об'єм роботи від перевезених пасажирів;

$\Gamma_{ваг}$ – пробіг рухомого складу;

G_n – маса вагону (поїзда) з пасажирами на перегонах $1, 2, \dots, n$;

A – загальна кількість пасажирів, які здійснили посадку (у тому числі пересадку) в потягу на усіх станціях;

W – повний або загальний пробіг вагонів;

$W_{пас}$ – пробіг вагонів з пасажирами;

W_0 – нульовий пробіг вагонів (без пасажирів);

$C_{вент}$ – швидкість повітряного потоку, індукована працюючою вентиляційною установкою;

$G_{ц}$ – циркуляційні потоки повітря;

$G_{вент}$ – вентиляційні потоки повітря;

$Q_{наб}$ – теплові надлишки в тунелях, асимільовані повітрям, що подається системою тунельної вентиляції;

$I_{кінц}$ – кінцевий, розрахунковий тепловміст повітря в тунелі в кінці розрахункової ділянки станції, з боку якої потяги входять на станцію $\text{ккал} / \text{год}$;

$I_{поч}$ – початковий, розрахунковий тепловміст зовнішнього повітря, відповідний для теплого періоду року;

U – напруга на струмоприймачі;

I – струм потягу;

V – швидкість;

S – шлях;
 $N(S)$ – послідовність режимів управління;
 $T(S)$, $V(S)$ – програми для розрахунку часу та швидкості;
 T – час;
 T_3 – заданий час ходу;
 T_j – час ходу на j -ому перегоні;
 N – позиція управління;
 k_i – кількість перемикачів позицій управління на i -ому кроці;
 N_i – номер позиції управління на i -ому кроці;
 T_i – час руху на i -ому кроці;
 V_{don} – допустима швидкість;
 I_{don} – допустимий струм поїзду;
 N_{min} – мінімальна позиція управління;
 N_{max} – максимальна позиція управління;
 λ – невизначений множник Лагранжа;
 v_T – відносна швидкість тунельного повітря;
 f – площа поперечного тунелю в m^2 ;
 u – периметр поперечного перетину тунелю в m ;
 α – коефіцієнт заповнення поїздом поперечного перетину тунелю;
 F – поперечний перетин вагона в m^2 ;
 m – кількість вагонів у складі;
 l_T – довжина тунелю між станціями в m ;
 L_n – довжина поїзду в m ;
 ρ – масова щільність повітря;
 F_k – сила тяги (пропульсивна сила);
 W_k – основний опір руху рухомого складу;
 F – площа міделевого перетину вагонів в i^2 .

Нижні індекси:

z – гідравлічний;

T – тунель;

i – номер кроку шляху на перегоні;

j – номер ділянки перегону.

Скорочення:

ТЗ – транспортні засоби;

МНС – Міністерство надзвичайних ситуацій;

АСУРПМ – автоматизована система управління рухом потягів метрополітену;

ЦПУ – центральний піст управління;

СП – станційний прилад;

РС – рухомий склад;

НФП – небезпечні фактори пожежу;

РЧХ – регулятор часу ходу.

ВСТУП

Одним з важливих напрямів розвитку транспортної інфраструктури сучасних країн є створення технологій та розроблення заходів щодо економічності, комфортабельності та безпечності транспортних засобів. Обов'язковими елементами залізниць є транспортні тунелі, будівництво яких збільшується у зв'язку з уведенням в експлуатацію високошвидкісних поїздів. Унаслідок істотного збільшення потоку перевезень і відповідно підвищення інтенсивності руху транспортних засобів набуває актуальності завдання розроблення моделей взаємодії транспортних засобів із повітряним середовищем, а також упровадження їх у практику. Головну увагу в монографії приділено дослідженню впливу повітряних потоків на техніко-експлуатаційні показники роботи рухомого складу та на показники, що визначають санітарно-гігієнічні умови й пожежобезпечність тунелів.

Аналіз особливостей пожеж і аварійних режимів вентиляції в тунелі свідчить про те, що в разі виникнення в тунелі пожежі особливо небезпечними є фактори пожежі, вплив яких повністю або частково блокує шляхи евакуації пасажирів, до того ж вони ускладнюють роботу пожежних підрозділів з порятунку пасажирів і гасіння пожежі. Актуальними завданнями є пошук нових шляхів, пов'язаних з локалізацією та гасінням пожежі, а також створення незадимленої зони на шляху евакуації пасажирів в місцях, де передбачено проведення робіт пожежними підрозділами. Одним з головних чинників, що впливають на тягове розрахування руху поїздів у тунелі, є взаємодія повітряного середовища з корпусом рухомого складу, а також з поверхнею тунелів. Водночас у наявних методах тягових розрахунків не враховано місцевих збурень повітряного середовища, що унеможливорює визначення впливу цих збурень уздовж перегону на потрібну силу тяги рухомого складу. Збурення повітряного середовища обумовлює стан необхідних санітарно-гігієнічних умов, проведення протипожежних заходів, кінематичні й геометричні характеристики рухомого складу метрополітену, а також істотно впливає на тягові та енергетичні характеристики рухомого складу [1-6].

Під неоднорідностями повітряного середовища всередині тунелю ми розуміємо неоднорідність повітряного потоку, що обумовлюється

відхиленням параметрів потоку щодо плоско-паралельної течії і збуреннями. Неоднорідності повітряного середовища всередині тунелю виникають унаслідок турбулентності руху повітряних мас; зриву потоку з поверхні рухомого складу; збурень, які створюються внаслідок роботи вентиляторів; збурень потоку, що виникають у місцях геометричних змін поперечного перерізу тунелю й однакові з місцевими гідравлічними опертями щодо виникнення; взаємодії циркуляційних потоків від зустрічного руху поїздів (для двоколійних тунелів – у зоні зустрічі поїздів; для одноколійних тунелів – поблизу горизонтальних поперечин).

Потрібно зазначити, що досліджувати вплив повітряного опору рухомого складу необхідно оскільки важливо вирішити такі прикладні завдання: підвищення економічності транспортних засобів унаслідок зменшення повітряного опору як рухомого складу, так і ліній тунелів; забезпечення вентиляції тунелів відповідно до санітарно-гігієнічних норм; забезпечення комфорту пасажирів і персоналу, який обслуговує, шляхом зменшення інтенсивності протягів на станціях і у вестибюлях; підвищення ефективності вентиляції і опалення вагонів, зниження рівня шуму; зменшення динамічних навантажень на панелі й інші елементи стін тунелю; пошук раціональних заходів щодо уникнення у тунелі надзвичайних ситуацій (локалізація пожежі, боротьба з розповсюдженням отруйних газів тощо).

Вирішення цих завдань набуває особливо важливого значення у зв'язку зі збільшенням інтенсивності руху транспортних засобів, обсягів будівництва тунелів, нових ліній метрополітенів і нового рухомого складу для них.

1 БАЗОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РУХОМОГО СКЛАДУ В ТУНЕЛІ

У першому розділі окреслено основні етапи розвитку наукової думки щодо визначення техніко-експлуатаційних та енергетичних характеристик рухомого складу тунелю, обґрунтовано актуальність обраного напрямку дослідження та сформульовано головне завдання удосконалення методу тягового розрахування рухомого складу на підставі розроблення методу визначення аеродинамічних характеристик транспортних засобів у тунелі. Основну увагу приділено дослідженню впливу аеродинамічних факторів на техніко-експлуатаційні характеристики підземного транспорту (метрополітену), що пов'язано зі збільшенням обсягів будівництва нових ліній метрополітенів і нового рухомого складу для них. Головними характеристиками, які визначали під час вирішення поставлених завдань були енергетичні характеристики рухомого складу з урахуванням неоднорідностей повітряного середовища.

1.1 Техніко-експлуатаційні характеристики рухомого складу

Можливості щодо підвищення енергоефективності залізничної системи на сьогодні ще не вичерпані, а отже, заходи зі зниження споживання енергетичних ресурсів необхідно спрямувати на вдосконалення інфраструктури й рухомого складу, а також методів керування рухом.

Крім того, залізниці є різновидом транспорту з прямою інфраструктурою, придатним для застосування комп'ютеризованих систем керування рухом і автоматизації функції водіння поїздів.

Витрати енергії прямо залежать від параметрів рухомого складу. Особливо це стосується аеродинамічних характеристик цього складу, ефективності тягового приводу тощо. Системи зв'язку і такі пристрої, як експертні системи, за допомогою яких машиніст отримує рекомендації щодо режимів руху або ефективних систем автоводіння, дають змогу поліпшити процес керування поїздом в реальному часі.

Стратегії організації руху високошвидкісних пасажирських потягів залежно від їхнього спрямування можна розподілити на три типи: за плануванням перевезень, за розробленням технологій енергоекономічного водіння поїздів і за способом керування рухом в реальному часі.

Крім того, необхідно враховувати, як розподіляється запас часу упродовж усієї поїздки не лише за критерієм пунктуальності відповідно до ймовірного розподілу затримок по всій лінії, але також і за критерієм ефективності використання енергії. Зрозуміло, що поїздка з максимальною швидкістю мінімальна за тривалістю і найбільша за споживанням енергії. Щодо регулювання руху високошвидкісних поїздів, то тут важливо забезпечити можливість модифікації в реальному часі режиму економного ведення поїзда за допомогою бортової інформаційної системи або системи автоводіння відповідно до появи тимчасових обмежень швидкості чи запізень.

Таким чином, енергоефективність експлуатаційної діяльності залізниць можна забезпечити за допомогою заходів, спрямованих на зменшення витрат тягової енергії на тягнення потягів. Ці стратегії, що оптимізують сценарії ведення потягів і розробку графіків руху, можуть помітно впливати на ефективність роботи залізничних систем.

У роботі головну увагу приділено питанням дослідження впливу повітряного опору на характеристики транспортних засобів у тунелі. Необхідно зазначити, що дослідження щодо визначення повітряного опору рухомого складу необхідні для вирішення таких прикладних завдань:

- підвищити економність транспортних засобів шляхом зниження повітряного опору як рухомого складу, так і ліній тунелів;
- забезпечити вентиляцію тунелів відповідно до санітарно-гігієнічних норм;
- забезпечити комфорт пасажирів і персоналу, який обслуговує, шляхом зменшення інтенсивності протягів на станціях і у вестибюлях;
- підвищити ефективність вентиляції і опалення вагонів, знизити рівень шуму;
- зменшити динамічні навантаження на панелі й інші елементи стін тунелю;
- розробити раціональні заходи щодо боротьби з надзвичайними ситуаціями у тунелі (локалізація пожежі, боротьба з розповсюдженням отруйних газів і тощо.).

Вирішення цих завдань набуває особливо важливого значення у зв'язку зі збільшенням інтенсивності руху транспортних засобів, обсягів будівництва тунелів, нових ліній метрополітенів і нового рухомого складу для них.

Базовими показниками роботи транспортних засобів є: пасажирообіг, пасажиро- й вантажонапруженість ліній, показники перевезень (відправлення, посадка, висадка, густина перевезень, середня дальність поїздки тощо) і роботи рухомого складу [7]. Крім того, використовують якісні показники, що оцінюють якість виконаної роботи і зручність для пасажирів.

Базовими для рухомого складу є тягові й енергетичні характеристики.

Питому витрату електроенергії на тягнення поїздів (порівняно з установленою нормою) визначаються як відношення фактичної витрати енергії в абсолютному обчисленні E (у кВт·год) до виконаного обсягу робіт $\Gamma_{\text{бр}}$ (у т·км, брутто):

$$E_T = E / \Gamma_{\text{бр}} \quad (1.1)$$

або

$$E_T = \frac{\sum_{n=1}^n E_n \cdot 1000}{\sum_{n=1}^n G_n l_n}, \quad (1.2)$$

де $\Gamma_{\text{оп}} = G_1 l_1 + G_2 l_2 + \dots + G_n l_n$;

$E = E_1, E_2, \dots, E_n$ – витрати електроенергії на перегонах $1, 2, \dots, n$, т;

G_1, G_2, \dots, G_n – маса вагона (потяга) з пасажирями на перегонах $1, 2, \dots, n$, т;

l_1, l_2, \dots, l_n – довжина перегонів $1, 2, \dots, n$.

Обсяг робіт у тонно-кілометрах ($\Gamma_{\text{оп}}$) складається із обсягу робіт у тонно-кілометрах від перевезених пасажирів ($\Gamma_{\text{пас}}$) і від пробігу рухомого складу ($\Gamma_{\text{ваг}}$). Отже,

$$E_T = \frac{\sum_{n=1}^n E_n \cdot 1000}{A l_{\text{сер}} g_{\text{пас}} + p_{\text{ваг}} W}, \quad (1.3)$$

де A – загальна кількість пасажирів, що здійснили посадку (зокрема й пересадку) у потязі на всіх станціях, співвідноситься із кількістю поїздок у межах цієї лінії;

$l_{\text{сер}}$ – середня дальність поїздки пасажирів (зокрема й пересадочних) у межах цієї лінії, м;

$g_{\text{пас}}$ – вага одного пасажиря, кг;

$p_{\text{ваг}}$ – вага вагона без пасажирів, кг;

W – повний, або загальний перебіг вагонів – сума перебігу вагонів із пасажирями і нульового: $W = W_{\text{пас}} + W_0$.

Питома витрата електроенергії обернено пропорційна $l_{\text{сер}}$. Абсолютні значення фактичної витрати електроенергії $\sum_{n=1}^n E_n$ на кожній лінії періодично знімають із лічильників. Уважається, що за максимальних швидкостей витрати електроенергії досить великі, але в такому разі зменшується час обігу поїзду на лінії, а відповідно, зменшується й кількість рухомого складу, що перебуває в русі. Отже, різноманітні варіанти тягових розрахунків і режими руху поїздів за перегонами доцільно супроводжувати техніко-економічним обґрунтуванням.

На техніко-експлуатаційні характеристики рухомого складу здебільшого впливають:

- режими руху поїздів;
- швидкість руху поїздів;
- «поршнева» дія поїздів;

- режими роботи вентиляторів;
- план і профіль шляху;
- геометрична досконалість тунелів.

У цій роботі головну увагу приділено дослідженню впливу повітряних потоків на техніко-експлуатаційні показники роботи рухомого складу і на показники, що визначають санітарно-гігієнічні умови й пожежобезпечність тунелів.

1.2 Вплив збурень повітряного середовища на базові характеристики рухомого складу

1.2.1 Утворення неоднорідності повітряного середовища

Рух повітряної маси всередині тунелю умовно можна розподілити на два складники: циркуляційні потоки, що виникають унаслідок виштовхувального (поршневого) впливу рухомого складу та вентиляційні потоки, що виникають унаслідок роботи системи вентиляції [8].

Поршневий ефект у тунелях виникає під час руху пасажирських поїздів з великою швидкістю і частотою пасажирських поїздів. Вони змінюють «живий» переріз і створюють попереду зону підвищеного, а позаду – зниженого тиску, що призводить до інтенсивного руху повітря в тунелях.

Вентиляційні потоки виникають унаслідок роботи примусової системи тунельної вентиляції. У наш час на метрополітенах використовуються дві її схеми: реверсивну й односпрямівну. Першу застосовують за середньої температури зовнішнього середовища найхолоднішого місяця (нижче 0°C), другу – вище 0°C . Вентиляційні потоки істотно впливають на сумарний потік повітряних мас у тунелі метрополітену, їх необхідно враховувати під час аналізу підземного транспорту.

Під неоднорідностями повітряного середовища всередині тунелю ми розуміємо неоднорідність у повітряному потоку, що обумовлюється відхиленнями параметрів потоку щодо плоско-паралельної течії і збуреннями [6]. Неоднорідність повітряного середовища всередині тунелю виникає внаслідок:

- турбулентності руху повітряних мас;
- зривання потоку з поверхні рухомого складу;
- збурень, що спричиняє робота вентиляторів (кількість і форма лопатей, обмеження за кількістю обертів, коливання напруги в мережі тощо)
- збурення потоку, що виникає у місцях геометричних змін поперечного перерізу тунелю й однакові з місцевими гідравлічними опертями щодо виникнення;
- взаємодії циркуляційних потоків від зустрічного руху поїздів (для двоколійних тунелів – у зоні зустрічі поїздів; для одноколійних тунелів – поблизу горизонтальних поперечин).

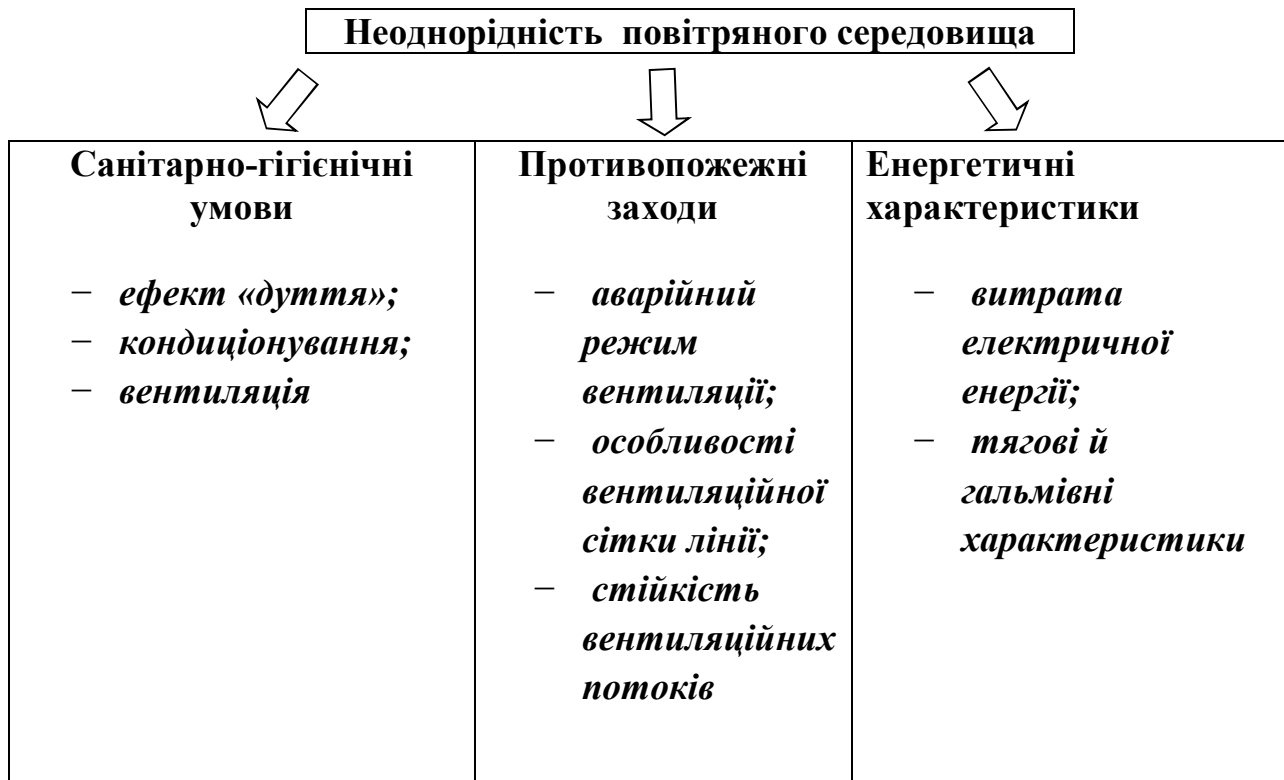


Рисунок 1.1 – Вплив неоднорідності повітряного середовища

Розглянемо механізм виникнення збурень потоку більш докладно.

Поїзд у тунелі діє на повітря подібно до поршня, формуючи стисну хвилю попереду поїзда і хвилю розрідження – за хвостовим вагоном. Обтікання поїзда у тунелі не є стаціонарним процесом, особливо на ділянках входу і виходу поїзда з тунелю. Нестаціонарні навантаження можуть перевищувати стаціонарні у декілька разів. Опір руху поїзда в тунелі перевищує опір руху поїзду на відкритій місцевості у декілька разів. Частка опору повітряного середовища руху поїзда у тунелі – до 90 % від повного опору. Значення тиску повітря на стінки поїзда значною мірою залежить від відношення площини міделя до поперечного перерізу поїзда. Під час входження поїзда у тунель спостерігається значне збільшення тиску порівняно з тиском на бічні стінки в разі зустрічі поїздів. Зрозуміло, що більшими мають бути й поперечні сили, що діють на стійкість руху чолової частини рухомого складу.

Унаслідок поршневої дії руху поїздів створюється надлишковий тиск або розрідження і потоки повітря з досить великою швидкістю виходять на денну поверхню або надходять у підземні споруди через двері вестибюлів і ескалаторний тунель, а також через вентиляційні відсіки або стовбури. Ця обставина, поряд з іншими факторами, сприяє підвищенню швидкості руху циркуляційних потоків повітря, що виникають під впливом поршневої дії поїздів. Величина швидкості переміщення циркуляційних повітряних потоків і тривалість їхнього знакозмінного руху залежать від інтенсивності й швидкості проходження поїздів, обсягу станції та інших факторів. Поршкову дію поїздів спричиняє різка та часта зміна швидкості руху циркуляційних

потоків повітря у спорудах метрополітену. У перегінних тунелях швидкість повітряних циркуляційних потоків змінюється у межах 0... 6 м/с, а його напрям збігається з напрямом руху поїздів. Миттєва зміна напрямку руху повітря – обернена до напрямку руху поїзда в зазорі під час входження поїзда зі станції у перегінний тунель – обумовлена сильним збуренням циркуляційних потоків повітря внаслідок різкого зменшення перерізу тунелю (сполучення станційного і перегінного тунелів) і великого опору повітряного середовища.

Струмінь повітря реверсується тільки в ескалаторних тунелях і вентиляційному відсіку. За основною частотою швидкості у ескалаторних тунелях змінюється за синусоїдним законом. Унаслідок поршневої дії поїздів сумарна кількість повітря, яке надходить на станцію або виходить через ескалаторний тунель і вентиляційний відсік (за частоти руху 20 пар/год), становить у середньому $45 \text{ м}^3/\text{с}$. Повітрообмін у підземних спорудах можна значно збільшити пропускаючи повітря через вентиляційний відсік при відкритих дверях камер і клапанів обох вентиляторів (у відімкненому стані). У разі зменшення пасажиропотоків періодично можна відмикати тунельні вентилятори (тривалістю не більше ніж 4 год) і забезпечувати постійне провітрювання підземних споруд тільки за допомогою поршневої дії рухомих поїздів. Регулярна перевірка якості тунельного повітря дає змогу регулювати роботу вентиляційних систем і її необхідно враховувати під час створення автоматичних систем контролю.

1.2.2 Вплив збурень повітряного середовища на санітарно-гігієнічні умови

Під терміном «вентиляція» потрібно розуміти змінювання повітря в будь-якому приміщенні з метою забезпечення у ньому умов, що відповідають санітарно-гігієнічним вимогам [9].

Повітрообмін у приміщеннях метрополітену повинен сприяти створенню комфортних умов, тобто забезпечувати такий стан повітря (температура, вологість і швидкість руху), за якого людина відчуває себе добре. За найгіршого варіанта обмін повітря повинен сприяти зменшенню ненормованих домішок або впливати на підвищення чи зниження температури повітря до межі, допустимої за санітарними вимогами.

У тунелях метрополітену спостерігається постійне виділення тепла, джерелами якого є рух поїздів, люди, потужне електричне освітлення. Якщо тунелі недостатньо ізольовані, то в них будуть просочуватися ґрунтові води, а отже, може відбуватися випаровування вологи й насичення нею повітря тунелю вище допустимої межі. Крім того, у воді, яка просочується через захисні споруди тунелю, можуть у розчиненому стані потрапити шкідливі гази, наприклад вуглекислота, аміак тощо. У колійних та станційних тунелях шкідливими можуть бути тепло; волога (водяна пара); вуглекислота; шкідливі гази, що виділяються з ґрунтових вод; пил.

Як відомо, людина відчуває тепло внаслідок сукупної дії на неї температури, відносної вологості й швидкості руху повітря, а тому під час вентилявання тунелів потрібно враховувати й третій фактор – швидкість руху повітря.

Рух поїздів тунелями, пов'язаний з подоланням опору повітряного середовища, спричиняє значний повітрообмін (що називається «дуттям»). Він супроводжується періодичним наростанням і зниженням швидкостей циркуляційних потоків повітря, а також коливаннями його тисків. Ці явища спричиняють неприємні відчуття у пасажирів та персоналу, який обслуговує, що перебувають у зоні «дуття» на посадкових платформах станцій. Коливання тиску повітря всередині тунелю призводить до передчасного руйнування личкування стін вестибюлів станцій і до інших негативних наслідків. Наслідком «дуття» є підвищений тепло- й масообмін повітря станції і атмосфери. Остання обставина призводить до зростання застудних захворювань персоналу метрополітену, особливо у холодну пору року, до збільшення енергетичних витрат на підтримання сталого температурного режиму станцій.

Таким чином, кількість повітря, необхідного для вентиляції тунелів у разі надлишку тепла, визначається залежно від:

- 1) гідрогеологічних умов на трасі тунелів;
- 2) оброблювального матеріалу тунелю;
- 3) температури ґрунту навколо тунелів;
- 4) швидкості руху повітря.

Тунелі метрополітену можна вважати виробничими приміщеннями. Щоб вирішити питання про їхню вентиляцію, потрібно аналізувати виробничі процеси, що відбуваються у них, встановлювати наявність шкідливих домішок і визначати необхідну кількість повітря. Допустимий вміст шкідливих домішок у повітрі метрополітенів встановлюється органами охорони праці та санітарії.

Використовують три способи вентиляції тунелів: повздовжній, поперечний і напівпоперечний.

У тунелях застосовують повздовжній спосіб вентиляції, який характеризується відсутністю у тунелі розвідних повітропроводів. У цьому разі сам тунель є повітропроводом, по якому проходить повітря, необхідне для його провітрювання. У разі використання електричної тяги поїздів є повздовжній спосіб вентиляції тунелів в цілому ефективним. До того ж цей спосіб найбільш дешевий щодо капітальних затрат витрат електроенергії під час експлуатації вентиляційних установ.

Напрямок руху повітря вздовж тунелю обумовлюється розташуванням за довжиною припливних і витяжних вентиляційних шахт. Під час спорудження ліній тунелів передбачають приточно-витяжну систему тунельної вентиляції, припливні й витяжні системи місцевої вентиляції. Провітрювання тільки за допомогою природної тяги не допускається. Система тунельної вентиляції повинна забезпечувати не менше ніж триразовий повітрообмін (підрхований за внутрішнім тунелів і станцій)

протягом однієї години. До того ж швидкість руху повітря у вентиляційних тунелях і стволах шахт не повинна перевищувати 8 м/с.

Для тунелів мілкого та глибокого закладання використовуються відповідні схеми вентиляції [10].

Природне провітрювання станцій мілкого закладення метрополітенів може бути забезпечене тільки у тому разі, якщо входи і виходи з платформи влаштовані у торчаках платформи і виходять безпосередньо назовні по повздовжній осі станції; за таких умов буде забезпечуватися наскрізне провітрювання станції. Природне провітрювання перегонів мілкого закладання тунелів метрополітенів відбувається внаслідок поршнеподібної дії поїздів і температурних перепадів між повітрям, яке виходить із тунелю і входить до нього. У перегонах мілкого закладання доцільно застосовувати штучне провітрювання за допомогою вентиляторів.

Найоптимальнішою є схема вентиляції перегону мілкого закладання, за якою приблизно посередині перегону розташовується одна шахта з вентиляторам, а з обох боків станції на незначній відстані від кінця посадкової платформи – по одній шахті без вентиляторів. У цьому разі перегін вентиляється самостійно і не залежно від вентиляції цієї станції, що значно спрощує схему його вентиляції. У літній період шахта з вентилятором працює на витяжку, а у зимовий – на приплив. Шахти без вентиляторів на зимовий період закривають на половину перетину, оскільки витяжка повітря частково відбувається через ці шахти. Наявність на перегоні двох вентиляційних шахт без вентиляторів економить вентиляційне обладнання та електроенергію, необхідні для переміщення повітря, а також спрощує проведення будівельних робіт, здешевлює будівельну вартість кожної шахти внаслідок відсутності у ній вентиляційної камери. Тупики тунелів мілкого закладання обладнують однією вентиляційною шахтою без вентиляторів, що розташовується у кінці глухого кута. Шахта необхідна для випускання через неї повітря, яке приганяється поїздами, за відсутності такої шахти повітря, прориваючись через вхідні двері наземного вестибюля кінцевої станції, спричинить у них дуже великі швидкості руху повітря і створить незручності для входу і виходу пасажирів.

У тунелях перехідного закладання (з мілкого на глибоке) використовують тільки штучну вентиляцію, застосовуючи вентилятори. У цьому разі опір природному руху повітря у вентиляційних шахтах настільки великий, що діє як поршень на поїзди що рухаються по одноколійних тунелях, тобто застосовується компресія і депресія, а також температурний перепад між повітрям, що виходить з тунелю і входить до нього, не забезпечуючи подання до тунелю необхідної кількості повітря. Для тунелів перехідного закладання потрібно використовувати схему вентиляції, що складається з однієї вентиляційної шахти з вентиляторам на глибокому закладанні (приблизно посередині перегону) і однієї вентиляційної шахти без вентиляторів, що розташовується поблизу станції мілкого закладення. У літній період шахта з вентиляторам працює на витяжку, а у зимовий – на

приплив. Шахти без вентиляторів на зимовий період наполовину закриваються.

У тунелях глибокого закладення необхідно застосовувати штучну вентиляцію, використовуючи вентилятори. Для цього посередині перегону споруджується одна вентиляційна шахта з вентилями, якої цілком достатньо навіть для вентиляції перегону завдовжки приблизно 2500 м, що є максимальним для використовуваних на сьогодні метрополітенів. По осі прилягання вентиляційної шахти до подорожнього тунелю споруджується сполучина між двома дорожніми тунелями. У літній період вентиляційна шахта працює на витяжку, а в зимовий – на приплив. Станції глибокого закладення повинні бути забезпечені штучною вентиляцією, що здійснюється за допомогою вентиляторів. Кількість повітря, яке подається на станцію через вентиляційну шахту, має важливе значення, оскільки його витрачають не тільки для вентиляції самої станції, а й прилеглих до неї ділянок перегонів. Вентиляційні шахти станцій глибокого закладення у літній період працюють на приплив, а в зимовий – на витяжку. У глухих кутах тунелів глибокого закладення влаштовуються невеликі сполучини, що з'єднують кінець тупика з обома колійними тунелями. Сполучини споруджують для перетікання через них повітря, яке приганяють поїзди, що входять у глухий кут. Споруджувати спеціальну вентиляційну шахту для вентиляції таких глухих кутів не обов'язково, але якщо вона є, то її можна використати з'єднавши вентиляційним каналом з глухими кутами. Для тунелів, що споруджуються для виходу у депо, як у разі мілкого, так і глибокого закладення, вентиляційні шахти не влаштовують, оскільки достатньо природного провітрювання.

Сполучні гілки між окремими радіусами метрополітенів можуть бути досить довгими. Незважаючи на це, природного провітрювання, що утворюється внаслідок різниці тисків повітряного середовища у тунелях із різним радіусом цілком достатньо. Будівельна шахта може бути використана для провітрювання окремої гілки, однак вентилятори у ній встановлювати не варто.

У схемі вентиляції тунелів обов'язковим є чергування припливних і витяжних шахт по всій довжині траси. Схеми вентиляції тунелів і станцій мілкого закладення задовольняють цю вимогу, оскільки вентиляційна шахта для станції (з вентилятором) і вентиляційні шахти на перегонах без вентиляторів (розташовані поблизу станції мілкого закладення) становлять одну припливну шахту. Трапляються випадки, коли на перегоні глибокого закладення неможливо спорудити вентиляційну шахту через велику густоту міської забудови. У тому разі застосовується схема вентиляції тунелів без перегінних шахт. До того ж для вентиляції тунелів під час використання зимового режиму холодне повітря не повинно подаватися на станцію, а тому його потрібно підігрівати шляхом змішування з теплим повітрям колійного тунелю, який за допомогою спеціального вентиляційного ходка підводиться до вентиляційної камери.

Потрібно зазначити, що у діючих метрополітенах унаслідок їхньої експлуатації відбувається не передбачене проектами сезонне регулювання повітрообміну, яке впливає на температурний режим на станціях та перегонах [11]. У разі виникнення несприятливих температурних умов на станціях і в тунелях ліній метрополітену необхідно встановити причини подібних змін. Для цього проводять порівняльні розрахунки або використовують загальні закономірності залежності температурного режиму від параметрів регульованого повітрообміну.

Низка заходів, спрямованих на зменшення капітальних витрат під час спорудження тунелів, а саме зменшення діаметру колійних тунелів, глибини закладання станцій і спрощення конструкції пішохідних виходів, призвели до посилення поршневого ефекту поїздів, що спричиняють рух повітря – «дуття» в тунелях і на станціях. Незважаючи на актуальність, проблема послаблення або ліквідації «дуття» на станціях метрополітенів вивчена недостатньо повно. Запропоновані у окремих роботах, наприклад у монографії В.Я. Цодікова [2, 3], заходи, що унеможливають «дуття», виявилися малоефективними, особливо для метрополітенів мілкового закладання, будівництво яких набуло поширення і в яких «дуття» значно інтенсивніше, ніж у метрополітенах глибокого закладання.

1.2.3 Гарантування пожежної безпеки рухомого складу

Аналіз особливостей пожеж та аварійних режимів вентиляції в тунелі доводить, що в разі виникнення в тунелі пожежі головну небезпеку становлять небезпечні фактори пожежі (далі – НФП), вплив яких може повністю або частково блокувати шляхи евакуації пасажирів. До того ж вони ускладнюють роботу пожежних підрозділів із порятунку пасажирів і гасіння пожеж [12-21]. Актуальним є завдання пошук нових шляхів вирішення цієї проблеми, пов'язаних із локалізацією та гасінням пожежі, а також створенням незадимленої зони на шляху евакуації пасажирів і в місцях, де передбачається робота пожежних підрозділів.

Одним із головних складників пожежної безпеки рухомого складу в тунелі є гарантування безпеки людей. Їх порятунок і успішна ліквідація пожежі обумовлюється правильним вибором і своєчасним застосуванням аварійного режиму вентиляції. У разі виникнення пожежі в тунелі або на станції метрополітену створюється небезпека швидкого розповсюдження продуктів горіння і виникає загроза життю декількох тисяч людей одразу. Із огляду на це необхідно розглянути найнебезпечніші ситуації, наприклад, коли поїзд із палаючими вагонами зупиняється в тунелі і необхідно вирішувати завдання, пов'язані із безпечною евакуацією пасажирів.

НФП поширюється тунелем за дуже короткий проміжок часу – внаслідок руху вентиляційних потоків. Для того щоб створити більш комфортні умови для роботи пожежних підрозділів, убезпечити пасажирів, які евакуюються, необхідно підвищувати ефективність аварійних режимів, а цього можна досягти шляхом застосування вентиляційних поперечин.

Поперечина діаметром 6 м придатна для перекриття тунелів метрополітену. Її експлуатаційні параметри такі: час установлення – 2–3 хв, мінімальна швидкість руху повітря, за якої поперечина функціонує – 0,5 м/с, вага – 20 кг. Однак для того, щоб парашутна поперечина перекрила перетин, необхідно, щоб сила, яка на неї діє, була більшою за її вагу в 1,5–2 рази. Отже, у перегінних тунелях її можна застосовувати тільки в тих місцях, де швидкість руху повітря становить 2,5–3,0 м/с. Пасивним засобом регулювання повітряних потоків є повітряні завіси, створювані вентиляторами.

Одним з головних елементів створення пожежної безпеки в тунелі є система димовидалення. Головним показником її задовільної роботи в разі виникнення пожежі є забезпечення надходження свіжого повітря на маршрутах евакуації пасажирів, маршрутах руху пожежних підрозділів та підрозділів Міністерства надзвичайних ситуацій (МНС). Це стосується будь яких тунелів, зокрема й метрополітенів [18].

У більшості метрополітенів використовується реверсна система вентиляції. Вона становить базу їхньої системи вентиляції, яка повинна видаляти дим і нагріті пожежні гази.

На сьогодні вибір режимів роботи вентиляторів під час пожеж в метрополітенах України регламентує інструкція 4095. У ній передбачено різні варіанти увімкнення вентиляторів залежно від місця виникнення пожежі.

Найважливішим етапом вибору аварійного режиму провітрювання пожежного об'єкта є оцінювання величини теплової депресії пожежі [19–21]. Під тепловою депресією пожежі розуміють збільшення статичного тиску упродовж виробітку шляхом зменшення щільності (ваги) повітря внаслідок його нагрівання. Ця депресія впливає на обсяг газоповітряного потоку загалом і розглядається як додаткове джерело тяги від нижнього кінця виробітку до верхнього (за найбільшими значеннями).

Оцінювання постійності провітрювання тунелів під час пожеж зводиться до визначення критичних параметрів тунелів в аварійних режимах роботи системи тунельної вентиляції і співставлення їх ніж величин із розрахунковими величинами теплової депресії пожежі.

Уразі виникнення пожежі на станції головною небезпекою є надходження продуктів горіння в ескалаторні ходки, переходи та вестибюлі. До того ж продукти горіння можуть повністю або частково блокувати шляхи евакуації пасажирів, водночас ускладнюючи доступ на станцію пожежним підрозділам. Часткове вирішення цього завдання забезпечується установленням на станціях і біля входів на ескалатори протидимних бар'єрів, а отже, актуальною проблемою забезпечення сталого спадного руху потоку повітря по ескалаторних сходках. Це питання є важливим не тільки тому, що уможливорюється безпечна евакуація пасажирів, але й збільшується ефективність ліквідації пожеж, оскільки чим швидше почати гасіння, тим меншими будуть матеріальні витрати на нього а отже і завдані метрополітену збитки.

Розглянемо загальну схему процесу надходження повітря на станцію глибокого закладення, оскільки такі станції мають свої особливості.

За звичайних умов спадний рух повітря по ескалаторній ходці повинен забезпечуватися роботою системи тунельної вентиляції «на витяжку», коли вентилятори, розташовані поблизу станцій і на найближчому перегоні, забирають повітря з тунелів і «видають» його на поверхню. Однак такий режим провітрювання ходки ескалатора не завжди можливий, насамперед через наявність природної тяги, яка внаслідок різниці температур створюється у вентиляційному контурі, що включає ескалаторні ходки та вентиляційні шахти. Ця тяга виникає внаслідок різниці висотних позначок тунелів і поверхні землі. Різниця висотних позначок визначає глибину закладання станції. Таким чином, спадному рухові повітря по ескалаторній ходці перешкоджає дія природної тяги. У теплу пору року температура повітря, що надходить з поверхні зазвичай вища, ніж у вентиляційній шахті, а взимку для цієї мети повітря нагрівають за допомогою калориферних установок. За звичайних умов роботи метрополітену напрям руху повітря в ескалаторних ходках зазвичай не надають великого значення. А надто зважаючи на те, що під дією поршневого ефекту рухомих поїздів він може змінюватися. У разі виникнення на станції пожежі, зупинці поїздів, висхідному русі повітря в ескалаторних ходках, виникає небезпека надходження в нього нагрітих продуктів горіння і утворення теплової депресії. На станціях глибокого закладання це практично неможливо.

Викладене вище свідчить про те, що завдання забезпечення постійного спадного руху повітря по ескалаторних ходках зводиться до того, щоб, з одного боку, попередити швидке надходження нагрітих продуктів горіння в ці ходки, а з іншого боку, – забезпечити оперативний перехід в режим «витяжки». Кількість вентиляторів, необхідних для подолання дії природної тяги та забезпечення спадного руху повітря в ескалаторних східцях, для кожної окремої станції потрібно визначати експериментально. Так, наприклад, на Салтівській лінії Харківського метрополітену здебільшого достатньо увімкнути «на витяжку» станційну і найближчу до неї перегінну вентиляційну установки [21]. Проте, точність розрахунків у цьому разі ускладнюється через відсутність інформації про найвищі позначки, хоча й приблизне оцінювання доводить, що у вентиляційних контурах з двоступінчастими ескалаторними ходками природна тяга під час холодної пори року може становити 50 Па і більше. Подолати протидію такої природної тяги тільки за допомогою роботи системи тунельної вентиляції дуже складно. Цікавим рішенням є використання рухомого складу, як своєрідних регуляторів, що підвищують вплив вентиляторів на режим провітрювання ескалаторних східців.

Отже, щоб розробити раціональні заходи щодо уникнення надзвичайних ситуацій у тунелі, необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести теоретичні дослідження особливостей тепломасопереносу під час пожежі в тунелі, відпрацювати методику розрахування теплових факторів пожежі.

2. Дослідити особливості визначення критичних параметрів газоповітряних потоків у тунелях і розробити методику їхнього розрахування.
3. Дослідити особливості вентиляційної мережі лінії і розробити для неї схеми вентиляції і вентиляційних з'єднань.
4. Визначити аеродинамічні параметри вентиляційної мережі лінії тунелю.
5. Дослідити особливості формування аварійних вентиляційних режимів за умов функціонування лінії метрополітену.
6. Розробити методику оцінювання постійності вентиляційних потоків під час пожежі у вагоні і зупинки поїзда в тунелі.
7. Розробити програмне забезпечення (інформаційну систему) для прискорення введення в дію аварійної вентиляції тунелів.
8. Розробити аварійні режими роботи тунельної вентиляції для лінії тунелю.
9. Введення аварійного режиму має супроводжуватися виконанням низки організаційно-технічних завдань:
 - додатково підвищити ефективність аварійних режимів можна шляхом застосування вентиляційних поперечин, що встановлюються пожежними після виникнення пожежі;
 - доцільно встановлювати повітряні завіси, що створюються за допомогою вентиляторів із щільним роздавальним пристроєм;
 - для попередження надходження нагрітих продуктів горіння в ескалаторні ходки станції глибокого закладання необхідно обладнати протидимними бар'єрами входів на ескалатори і увімкнути «на витяжку» найближчі до станції вентиляційні установки;
 - у тих випадках, коли робота вентиляційних установок метрополітену не забезпечує постійного спадного руху повітря по ескалаторних східцях, для підвищення стійкості варто передбачити використання порожніх складів.

Дослідженню питань димовидалення та роботи системи тунельної вентиляції метрополітенів присвячено роботи В. Я. Цодікова [2, 3], В. П. Беяцко, А. М. Ригова, В. С. Махіна та ін. [12-16]. Необхідно зазначити, що, розглядаючи проблеми димовидалення в комплексі з проблемами стійкості газоповітряних потоків у тунелях метрополітену, автори роботи [21] орієнтувалися на методики, розроблені для вугільної галузі. Усі елементи (етапи) технології вибору й оцінювання ефективності аварійних вентиляційних режимів, розроблені для вугільної галузі, майже повністю, застосовні для метрополітенів. Однак складність полягає у відсутності методичного забезпечення застосування цієї технології для метрополітенів.

Не можна не прослідкувати аналогії і з автодорожніми тунелями.

Багато працівників метрополітенів, пожежних служб і дослідники взагалі дотримуються тієї думки, що в системах метрополітенів або зовсім

немає незалежної системи повітряних потоків, або система потоків обумовлюється характеристиками вітру в зовнішній зоні біля порталів тунелів або рух повітря «в глибині тунелю» залежить тільки від руху поїздів.

Ці припущення виявилися невірними. Якщо визначити напрям розповсюдження шкідливих речовин у простих транспортних тунелях можна відносно легко, то цього не можна зробити щодо тунельних споруд метрополітенів. Залізничні або автодорожні тунелі з однієї або двох труб зазвичай мають мало поперечних з'єднань, а обидва протилежні портали є головними отворами. Метрополітен, навпаки, становить собою складну мережну систему з численними вертикальними і горизонтальними поперечними з'єднаннями. Система повітряних потоків у такій мережі тунелів і станцій, на відміну від простих тунелів з їхніми двома можливими напрямками повітряних потоків, має багато варіантів; це, зі свого боку, впливає і на визначення можливих шляхів проведення рятувальних робіт та на напрям виведення людей з небезпечної зони. У разі пожежі або виникнення терористичного акту стан цієї системи потоків буде впливати на поширення диму, хімічних і біологічних речовин усередині метрополітену і в прилеглих до нього зонах на поверхні землі. Та обставина, що поширення диму й інших отруйних речовин обумовлюється тільки характеристиками розглянутих потоків, тобто повітрообміном між станцією і тунелем, а також між метрополітеном і зовнішньою атмосферою свідчить про те, що дослідження у цьому напрямі необхідно продовжувати, щоб запобігати катастрофам та забезпечити ефективне усунення їхніх наслідків.

Потрібно відзначити і той факт, що огляд зарубіжних досліджень щодо розповсюдження повітряних потоків у підземних спорудах метрополітену [22, 23] свідчить що те, що коли мова йде про динаміку повітряних потоків у підземних тунельних системах, то утворюється надзвичайно складна структура, що обумовлюється впливом чисельних факторів. У процесі проведених досліджень було встановлено, що рух повітря буде не простим, безперервним, рівномірно сформованим, а це буде система складних потоків, варіювання яких у просторі та часі буде надзвичайно різноманітним. Було також доведено наявність у тунелях базового й фонових повітряних потоків, на які не впливають рух поїздів і робота вентиляційних пристроїв. Водночас використовувані методи визначення аеродинамічних та інших характеристик рухомого складу не враховують наявності у тунелі повітряного потоку зі складною структурою. Із огляду на це автори провели низку наукових досліджень у цьому напрямі.

Потрібно вказати і на те, що кожна система тунелів внаслідок будівельних, геологічних та інших особливостей характеризується власною динамікою повітряних потоків, яку необхідно спеціально вивчати для того, щоб застосувати оптимальні заходи в разі виникнення надзвичайних ситуацій [24].

1.2.4 Вплив повітряного опору на кінематичні й геометричні характеристики поїздів

На поїзд, який рухається, впливає навколишнє повітряне середовище, що спричиняє утворення постійно діючого опору його руху. Виникнення повітряного опору обумовлюється в'язкістю самого повітря, тобто властивістю його часток створювати опір відносно свого руху.

Якщо розглянути схему взаємодії поїзда і повітряного середовища (рис.1.2), то можна встановити такі причини виникнення повітряного опору:

- а) на чолову поверхню поїзда тисне повітря;
- б) біля задньої і бічних поверхонь повітря розріджується й завихрюється;
- в) між поверхнями поїзда і повітрям виникає тертя;
- г) усі колеса вагонів працюють як вентиляторні колеса.

Завдання визначення повітряного опору рухомого складу зводиться до визначення впливу таких чинників:

- вплив фонових (збурених) потоків повітря (на людей на станції, на будову метрополітену, на зустрічний потяг, на вхід у тунель, на аероакустику);
- вплив повітряних потоків на поїзд (опір електропоїзду, міжвагонному проміжку, міжвагонним перекриттям, опір під вагоном, на перекриття дна вагона тощо).

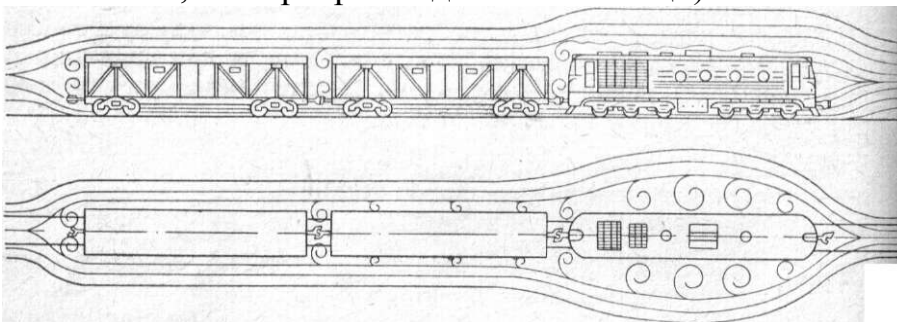


Рисунок 1.2 – Схема взаємодії поїзда і повітряного середовища

На величину повітряного опору, особливо в разі великих швидкостей під час руху, помітно впливає форма рухомого складу, що обумовлює умови обтікання повітряним потоком. Наявність на поверхні тіла виступів з гострими гранями призводить до обриву в таких місцях струменів повітря і утворення вихорів (турбулентний рух). У межах вихрових рухів повітря створюється менше порівняно з тиском навколишнього потоку розрідження, і вихор ніби намагається всмоктати тіло, яке рухається і гальмує його рух. У разі руху в повітрі тіла, яке має обтічну форму, струмені повітря ніби «розступаються» перед ним, а позаду нього знову сходяться, вирівнюються і утворюють паралельні лінії. Таке обтікання тіла називається плавким струменевим, не вихровим (ламінарним). Отже, тілам потрібно надавати такі форми, за якої утворення вихорів було б мінімальним. Це подовжені, краплеподібні або сигароподібні форми, звані обтічними.

Ідеальною обтічною формою вважається форма спадної краплі, повітряний опір щодо якої мінімальний. У зв'язку з цим обтічної форми надають локомотивам як головній частині поїзда, одночасно усуваються всі виступи і нерівності на вагонах, особливо швидкісних поїздів.

За швидкісного руху повітряний опір набуває домінантного значення порівняно з механічним (тертя коліс тощо), тому за умов високошвидкісного руху важливо обрати таку форму поїзда, за якої повітряний опір буде найменшим.

Щодо аеродинамічних характеристик швидкісних поїздів, необхідно досліджувати не тільки проблеми, пов'язані з опором руху рухомого складу.

Для швидкісних поїздів важливим також є вплив повітря на людей. Необхідно розглянути особливості розподілу швидкостей повітряного потоку вздовж станції, впливу аеродинамічних сил на людину, що опинилася під впливом цього потоку [25–28].

Забезпечення низького коефіцієнту повітряного опору поїзду шляхом обрання його оптимальної геометричної форми, уможливить зменшення впливу повітря або убезпечить від виникнення повітряних «ударних» хвиль під час проїзду повз нерухомі й рухомі об'єкти, а також під час входження в тунель і проїзду по ньому.

До проблем, пов'язаних із аеродинамічними характеристиками швидкісного поїзда, належать аероакустичні. Зі збільшенням швидкості руху поїзда збільшується й інтенсивність відірваних турбулентних потоків, що генерують шуми. Шум під час руху швидкісного поїзда створюють рух коліс і потоків аеродинамічного обтікання. Особливості й наслідки впливу джерел шуму при високих швидкостях ще недостатньо вивчені.

У роботі [25] подано результати досліджень у цих напрямках, зокрема визначення частки аеродинамічного шуму в загальному шумі. Аеродинамічний шум зі збільшенням швидкості набуває все більшого значення щодо загального шуму, а його частка збільшується зі зменшенням шуму коліс.

Щоб визначити опір повітряного середовища, необхідно окремо визначити опір кожної з таких частин поїзда:

- електропоїзда;
- одного з вагонів разом з міжвагонним проміжком;
- останнього вагона, на задньому торчаку якого виникає розрідження, що спричиняє додатковий чоловий опір.

У 20–30-ті роки XX ст. було створено перші роботи щодо визначення повітряного опору поїзда [4], у яких зазначається, що, змінивши форму поїзда, коефіцієнт чолового опору можна зменшити до 0,3–0,4. Пізніше це було підтверджено дослідженнями [25, 26] у діапазоні чисел Рейнольдса $0,5 \times 10^6$ – $1,4 \times 10^7$ на моделях поїздів з різною кількістю головної частини і різним числом вагонів у аеродинамічній лабораторії Інституту механіки (НДІМ) МДУ.

Кількісно величина повітряного опору визначається на підставі базових тверджень аеродинаміки і може бути подана у вигляді функції, пропорційної до:

- а) швидкісного напору повітря $\frac{\rho v^2}{2}$ (де ρ – щільність повітря, тобто його маса в одиниці об'єму, $\text{кг}\cdot\text{с}^2/\text{м}$);
- б) площі поперечного перетину поїзда, $\Omega \text{ см}^2$ (приймається міделевий перетин);
- в) довжині поїзда L , м ;
- г) деякого безрозмірного коефіцієнта C_x , що характеризує обтічність поїзда.

Таким чином, величину повітряного опору визначають так:

$$W_B = C_x \frac{\rho v^2}{2} \Omega L \quad (1.4)$$

Хоча аеродинамічні явища під час руху поїзда в дійсності значно складніші порівно з описаним рівнянням (1.4), під час розрахування повітряного опору поїзда використовують цю формулу, а розбіжність визначають за коефіцієнтом обтічності C_x , який зазвичай встановлюється експериментальним шляхом із використанням аеродинамічних труб (ураховуючи умови руху поїзда). Коефіцієнт обтічності C_x характеризується ступенем наближення рухомого складу до форми ідеального обтічного тіла. Аналіз величин C_x [25] дає змогу зробити такі висновки:

1. Для поїздів, які не мають обтічної форми, коефіцієнт обтічності змінюється в межах від 0,9 до 1,0.
2. У разі наявності обтічної форми C_x поїзда знижується до 0,45–0,55.
3. Для електропоїздів $C_x = 0,9\text{--}1,28$. У головного вагона електропоїзда він становить 0,64.

Бічний вітер збільшує загальний повітряний опір поїзда. Найнесприятливішим є напрям вітру під кутом $20\text{--}25^\circ$ до напрямку руху.

Питомий повітряний опір поїзда визначають так:

$$\omega_B = \frac{C_x \rho v^2 \Omega L}{2(P + Q)} = \frac{C_x \rho v^2 \Omega L}{2nq_0}, \quad (1.5)$$

де n – кількість осей у поїзді;

q_0 – середнє навантаження від осі на рейку.

З рівняння (1.5) випливає, що величина питомого повітряного опору обернено пропорційна до ваги рухомого складу. Отже, з енергетичного погляду вигідніше перевозити склади з найбільшим прогонним навантаженням.

Питомий основний опір рухомого складу отримують експериментальним шляхом. Із цією метою проводять спеціальні досліді в умовах експлуатації.

Результати дослідів математично обробляють і на їхній підставі складають емпіричні формули або графіки для визначення величин питомого основного опору. Пропоновані формули й графіки дають середні сумарні (не розчленовані) величини питомого основного опору залежно від трьох найголовніших чинників: швидкості, середнього навантаження від осі на рейку, конструкції рухомого складу. Вплив інших факторів оцінюється коефіцієнтами, що входять до формули, або формою графічної залежності. Вплив конструкції рухомого складу зазвичай враховується в пропонованих формулах і графіках, що стосується тільки цього різновиду й типу одиниць рухомого складу.

Зі збільшенням швидкості руху повітряний опір різко збільшується. Це збільшення потрібно зменшувати шляхом зменшення коефіцієнта обтічності C_x . Інакше кажучи, локомотив і вагони швидкісних поїздів повинні мати обтічну форму.

Зі свого боку, повітряний опір також визначають надбудовані на його корпусі конструктивні елементи, міжвагонні перекриття тощо. Як зазначено в роботі [26], опір повітряного середовища вагона містить три складники:

- опір кузова вагона з усіма виступними частинами;
- опір міжвагонного проміжку, який вважається складником вагона;
- опір скатів і інших частин, розташованих під вагоном.

Головним складником опору кузова вагона є опір тертя повітря об його бічну поверхню й виступні частини. Оскільки поверхнєве тертя на бічних стінках і даху вагона визначається режимом їхнього обтікання, то воно залежить від особливостей межового шару і розподілу швидкостей частинок у ньому. Як засвідчили натурні експерименти, розподіл швидкостей по товщині межового шару y_i має таку ступеневу залежність:

$$\frac{v_i}{v_0} = \left(\frac{y_i}{\delta} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (1.6)$$

де $m = 7$ для шару на даху вагона і $m = 10$ – на його бічній стінці. Така ступенева залежність встановлена для чисел Рейнольдса – $Re < (5-7) \cdot 10^7$, а для великих чисел розподіл швидкостей у межовому шарі практично співпадає з логарифмічною залежністю.

Під час визначення опору тертя використовують таку формулу:

$$W_f = C_f S_f q_0, \quad (1.7)$$

у якій коефіцієнт тертя

$$C_f = \frac{0,074}{\sqrt[5]{Re}}, \quad (1.8)$$

де S_f – сума площ поверхні даху, бічних стінок і дна вагону;

q_0 – швидкісний напір повітряного потоку, що співпадає із швидкістю руху поїзда на відкритій трасі.

Таким чином, сила повітряного опору внаслідок тертя залежить не тільки від режиму обтікання рухомого складу, що визначається числом Рейнольдса, але й від швидкісного напору і від суми площ поверхні даху, бічних стінок і дна вагона. Отже, повітряний опір тертя пропорційний кількості вагонів, а ця частка опору за деякої кількості вагонів може виявитися рівною або перевищити опір повітряного середовища чолової частини потяга.

Розглянемо, як впливають повітряні потоки на опір міжвагонного простору в разі зміни конфігурації його огорожі та збільшення швидкості руху.

Зі збільшенням швидкості руху вплив повітряних потоків на опір поїзда стає визначальними. З робіт [27, 28] випливає, що в разі швидкості руху 30 км/год повітряний опір рухомого складу становить всього 6 % від повного опору, обумовленого механічними факторами; зі збільшенням швидкості руху до 100–160 км/год значення процесів аеродинаміки зростає і становить уже 35–40%. Нарешті, якщо швидкість становить 350 км/год, повітряний опір рухомого складу дорівнює його повному опору.

Зі збільшенням кількості вагонів у складі (незважаючи на деяке збільшення опору повітряного середовища) питомий основний опір руху внаслідок збільшення ваги поїзда зменшується. Повітряний опір є головним складником основного опору руху. Найбільше питомий опір руху підвищується в тунелі малого діаметра, якщо вагони полегшені.

Потрібно враховувати, що повітряний опір руху зростає пропорційно до квадрата швидкості руху поїзда, а механічний опір, обумовлений станом рейкових шляхів – до роботи механізмів передачі тяги, ваги складу та інших факторів, змінюється лінійно до швидкості. Отже, за деякого значення швидкості опір повітряного середовища стає визначальним порівняно з механічним. З поліпшенням геометрії і обтічності рухомого складу опір повітряного середовища зменшується (табл. 1.1). Тому вирішення технічного завдання щодо створення досконалої аеродинамічної форми є однією з найважливіших проблем швидкісного руху. Беручи до уваги результати експериментальних досліджень [26], можна визначити, як впливає зовнішня геометрія вагона (зокрема і міжвагонного простору) на абсолютний (C_x) і

відносний $\left(\frac{\Delta C_x}{nC_x} \right)$ опір повітряного середовища, якщо поїзд складається з

трьох (шести) вагонів, конфігурація яких така сама, як і чолової частини головного вагона.

Таблиця 1.1 – Зниження опору повітряного середовища рухомого складу внаслідок вдосконалення аеродинамічної форми елементів його конструкції

Елементи конструкції поїзда	Зниження опору повітряного середовища, %
Обтічники головної і хвостової частин	20–23
Обтічники підвагонної частини	15–20
Фальшборти	10–12
Перекриття міжвагонних просторів	5–7
Обтічники надбудов кузова	3–5
Заглиблення поручнів і вікон	3–4

Аналіз отриманих розрахунків доводить:

- повне перекриття міжвагонних проміжків практично ліквідує зони зриву і вихороутворення, що й призводить до зменшення повітряного опору вагона й поїзда в загалом;
- оскільки повністю перекрити міжвагонні проміжки технічно досить складно, необхідно розглянути задачу щодо часткового перекриття міжвагонного простору;
- в міжвагонному просторі утворюється один стійкий вихор, ядро якого розташовується ближче до верхньої частини вагона. Зі збільшенням швидкості руху поїзда (V_{∞}) інтенсивність обертання вихору збільшується;
- якщо міжвагонні проміжки відкриті, обтікання кожного наступного вагона погіршується внаслідок дії місцевих відривних течій на його передню окрайку, що призводить до збільшення коефіцієнта опору тертя і повітряного шуму;
- якщо швидкість руху (V_{∞}) становить 60 км/год, відкритий міжвагонний простір спричиняє малі втрати потужності, а в разі досягнення швидкості 140 км/год ці втрати збільшуються майже в десять разів, хоча й залишаються невеликими. Якщо швидкість (V_{∞}) становить 140 км/год, повністю перекритий міжвагонний простір, порівняно з відкритим, зменшує майже у вісімнадцять разів втрати потужності, обумовлені опором міжвагонного проміжку;
- у разі подальшого збільшення швидкості руху зберігається тенденція до зростання абсолютних втрат потужності, тому для великих швидкостей руху поїзда потрібно розв'язати задачу з урахуванням перекриття міжвагонного простору.

Специфічною особливістю аеродинаміки підвагонного простору є те, що відносна швидкість руху повітря поблизу скатів, деталей колісних візків

та інших виступних частин менше за швидкість руху вагона. Відносна швидкість повітря в точках поперечного підвагонного простору різна. Поблизу дна вагона вона дорівнює швидкості поїзда, а біля землі – нулю. Враховуючи незначну обтічність підвагонних деталей, їх опір орієнтовно оцінюють коефіцієнтом C_x , який дорівнює 1,0.

Розглянемо опір повітряного середовища хвостової частини поїзда.

За крайкою останнього вагона зі зростанням швидкості поїзда виникає область зниженого тиску, що спричиняє утворення додаткового повітряного опору. Експериментально встановлено [5], що на величину цього опору повітряного середовища впливають як кількість вагонів, так і форма хвостової і чолової частин. У п'ятивагонного поїзда, якщо обтічність головної частини достатня, а хвостової недостатня загальний опір збільшується на 20 %. Достатня обтічна форма головної і хвостової частин знижує опір поїзда більш ніж на 50 %. Розглянемо, як на величину опору повітряного середовища впливає форма поперечного перерізу (міделя) вагона.

Формою вагона в поперечному перерізі обумовлюється розподіл тиску на обтічних поверхнях вагона, а отже і розподіл сили опору повітряного середовища, бічної і підіймальної сил. Удосконалена форма міделя, порівняно з прямокутною, може призвести до зменшення аеродинамічних коефіцієнтів бічної сили на 39 %, а підйомної – на 33 %.

Крім того, відривні течії на гострих окройках прямокутної форми міделя спричиняють додатковий розподіл тиску, що обумовлює виникнення вібрацій і шумів.

Урахування особливостей обтікання рухомого складу дає змогу знизити коефіцієнт його опору повітряного середовища до необхідних значень шляхом вдосконалення аеродинамічної форми елементів конструкції поїзда.

Обтічна форма рухомого складу істотно впливає на зменшення опору руху: зниження опору повітряного середовища на 5–10 % спричиняє зменшення основного опору на 2–2,5 % якщо швидкість становить 60 км/год.

Наявність в міських агломераціях і їхніх передмістях рейкового транспорту, що має велику провізну здатність сприяє поліпшенню транспортного обслуговування населення.

З метою зменшення капітальних вкладень у будівництво та експлуатаційних витрат (наприклад у деяких містах Японії) лінії метрополітену стали прокладати в тунелях із меншою площею поперечного перерізу. На таких лініях в Осаці використовують поїзди з вагонів меншої ширини і висоти, але зберігається достатній простір для пасажирів. У тяговому приводі таких поїздів застосовуються лінійні індукційні двигуни. Удосконалюються також роторні тягові двигуни.

2 ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕННЯ

У другому розділі обґрунтовано вибір напрямку досліджень, викладено загальну методику проведення дослідження. За допомогою аналізу впливу неоднорідності повітряного середовища на енергетичні характеристики рухомого складу розроблено метод розрахування повітряного опору рухомого складу в тунелі, на який впливають вентиляційні потоки, втрати на місцевих гідравлічних опертях по всій довжині активної ділянки, нестационарність руху повітряного середовища.

2.1 Аналіз методів визначення характеристик рухомого складу з урахуванням неоднорідності повітряного середовища

Під час руху поїзда по трасі значна частина енергії витрачається на подолання сил опору руху. Особливо великого значення ця частина енергії набуває в тунелі, де опір руху поїзда набагато більший, ніж на поверхні. У метрополітені на подолання сил опору руху витрачається від 20 до 40 % всієї споживаної рухомим складом електроенергії [5]. Важливість впливу опору руху на експлуатаційні показники роботи транспортних засобів у тунелі змушує приділяти цьому питанню більше уваги. Для визначення ролі опору руху в загальному балансі витрати електроенергії на тягу поїздів можна встановити складники цієї витрати для різних типів вагонів та вплив на нього обтічності вагонів і габаритів тунелю. Вирішення цього завдання стає особливо важливим із огляду на поширеність будівництва метрополітенів і нового рухомого складу для них.

Визначимо, як саме впливає повітряний опір на енергетичні характеристики поїздів (рис. 2.1).

Щоб дати оцінку цим складникам, більш детально розглянемо наявні методи розрахування повітряного опору.

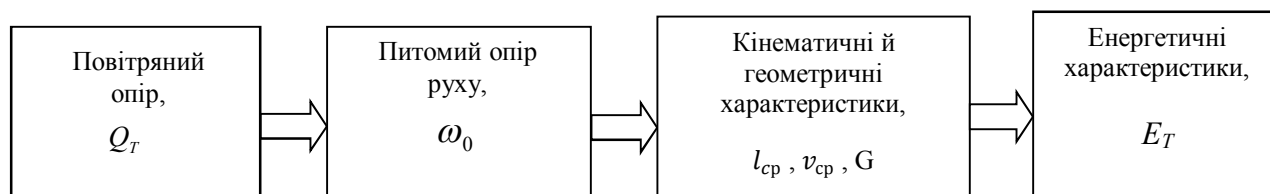


Рисунок 2.1 – Механізм впливу повітряного опору на енергетичні характеристики поїздів

На сьогодні відомо декілька інженерних методів розрахування опору повітряного середовища під час руху поїзда в тунелі [2–5], які базуються на застосуванні теорії течії в трубопроводах. Ці методи дають змогу визначити, як впливають умови руху на величину опору, залежність опору від різних параметрів рухомого складу й тунелю, що уможливорює оцінювання в

першому наближенні економічної доцільності конструктивних змін рухомого складу та тунелю. Однак зазначені методи містять багато неточностей, які спотворюють повну картину аеродинаміки рухомих транспортних засобів.

Найбільш поширеним у практиці проведення інженерних розрахунків є метод, запропонований Г.Н. Абрамовичем [4], у якому опір повітряного середовища в тунелі визначається як добуток опору повітря руху складу поза тунелем (на відкритій трасі) на коефіцієнт, величина якого обумовлюється габаритами тунелю і зовнішньою формою поїзда. За наведеними в роботі [4] розрахунками можна встановити, що величина повітряного опору відрізняється від дослідних даних на 20 %. Порівняння розрахункових даних повітряного опору з дослідними даними, наведеними в роботі [5], доводить, що максимальна величина відмінностей становить 35 %. Недостатня точність розрахункових даних обумовлена припущеннями, використаними під час виведення формули опору: коефіцієнти тертя повітря об стінки тунелю прийняті без урахування шорсткості стін, а опір тертя повітряного потоку об стінки вагона визначається без урахування нерівномірності швидкості цього потоку в проміжку між поїздом і стінками тунелю.

З метою наближення розрахункових даних до поданих у роботі [2] зроблено спробу вдосконалити запропонований Г. Н. Абрамовичем метод розрахування повітряного опору поїзда в тунелі. При цьому запропоноване в роботі В.Д. Радченко [5] уточнення формули для розрахування опору повітряного середовища під час руху поїзда в тунелі стосується тільки напівемпіричних коефіцієнтів.

Необхідно зазначити, що в описаних вище методах вентиляційні потоки в тунелі не враховано.

Дослідженню взаємовпливу вентиляційних та циркуляційних потоків повітря в тунелі метрополітену присвячені роботи [2, 3]. Щоб визначити, як впливають вентиляційні потоки під час розрахування сумарного циркуляційного потоку, В. Я. Цодіков запропонував врахувати швидкість $C_{\text{вент}}$ повітряного потоку, індуквану роботою вентиляційної установки:

$$C_{\text{вент}} = \frac{G_{\text{вент}}}{f} = \frac{Q_{\text{наб}}}{((I_{\text{кінц}} - I_{\text{поч}}) - \frac{Q_{\text{наб}}}{4G_{\text{ц}}}) \cdot f}, \quad (2.1)$$

де $G_{\text{ц}} \approx G_{\text{заг}} - G_{\text{вент}}$;

$Q_{\text{наб}}$ – теплонадлишки в тунелях, асимільовані повітрям, що подається системою тунельної вентиляції;

$I_{\text{кінц}}$ – кінцева розрахункова тепломісткість повітря в тунелі в кінці розрахункової ділянки станції, з боку якого поїзди входять на станцію, ккал/год;

$I_{\text{поч}}$ – початкова, розрахункова тепломісткість зовнішнього повітря для теплого періоду року відповідно, ккал/кг.

Під час руху поїздів по одноколіїному тунелю і під час роботи примусової системи тунельної вентиляції по поздовжній схемі напрям вентиляційних потоків повітря ($G_{вент}$) співпадає з напрямом руху поїздів і циркуляційних потоків ($G_{ц}$). До того ж на ділянці тунелю між припливною та витяжною вентиляційними установками в напрямі руху поїздів відбувається поєднання циркуляційних потоків повітря з вентиляційними – зовнішніми, примусово поданими в тунель.

На ділянці тунелю між витяжною і припливною вентиляційними установками в напрямі руху поїздів відбувається розсіювання вентиляційних потоків, що видаляються на поверхню витяжною вентиляційною установкою. У русі повітря по тунелю беруть участь також припливні й витяжні установки тунельної вентиляції, що працюють за поздовжньою схемою. У роботах [2, 3] доведено, що вентиляційні потоки істотно впливають на сумарний рух повітряних мас у тунелі, а отже їх необхідно враховувати під час аналізу опору рухомого складу. Необхідно відзначити, що в роботах В. Я. Цодікова об'єктом дослідження є ізольований тунель нескінченної довжини, а сама методика розрахування основного опору враховує тільки стаціонарне повітря.

Дослідження і розроблення методу розрахування споживаної кількості повітря для провітрювання ділянок траси, що враховує циркуляційні потоки повітря, які утворилися під час руху поїздів, і вплив поршневої дії поїздів на роботу тунельних вентиляторів відповідно до обраної схеми провітрювання досліджено в роботі [3]. У ній зазначається, що поршневу дію рухомих потягів спричиняє нестационарний режим роботи тунельних вентиляторів, а також розроблено метод розрахування необхідної кількості повітря для провітрювання ділянок траси метрополітену, що враховує рециркуляцію повітря в мережі, вплив поршневої дії поїздів на роботу тунельних вентиляторів і температуру тунельного й атмосферного повітря.

Таким чином, аналіз наявних інженерних методів розрахування аеродинамічних характеристик «вагон – тунель» доводить, що їхніми головними недоліками є припущення про стаціонарність потоку і неврахування вентиляційних потоків у тунелі.

На підставі аналізу літературних джерел виокремлено такі головні завдання аеродинаміки транспортних засобів:

- 1) розроблення математичних методів розрахування і проведення досліджень аеродинамічних характеристик транспортних засобів і тунелів з більш повним урахуванням базових експлуатаційних і конструктивних параметрів;

- 2) розроблення математичних моделей і проведення досліджень впливу різних параметрів на процеси повітрообміну в тунелі з метою зменшення ефекту «дутья» та забезпечення санітарно-гігієнічних вимог;

- 3) розроблення математичних моделей і проведення досліджень аварійних ситуацій в тунелі з метою розроблення раціональних заходів

боротьби з виникненням надзвичайних ситуацій в тунелі (локалізація пожежі, боротьба з поширенням отруйних газів тощо.).

У цій роботі увага приділяється розробленню методу розрахування аеродинамічних характеристик рухомого складу метрополітену, у якому враховано неоднорідність повітряного середовища, тобто вирішується перше завдання з наведеного вище списку.

2.2 Модель взаємодії рухомого складу та елементів споруд тунелю з повітряним середовищем

Розглянемо, як переміщується довге тіло, що рухається усередині довгого тунелю із постійним поперечним перерізом круглої форми (рис. 2.2). Рух тіла створюється й підтримується в наслідок дії деякої пропульсивної сили, прикладеної в проміжку між тілом і стінкою тунелю (наприклад у наслідок дії сили тертя між колесами й рейками). Загалом ця пропульсивна сила деяким чином залежить від швидкості переміщення тіла й визначається тяговою характеристикою двигуна.

У цьому разі спостерігається певний різновид руху повітря в трубі, стаціонарний або нестаціонарний залежно від обраної системи [4]. Під час аналізу потрібно розділити поле течії на *далеке поле*, що займає весь простір тунелю, за винятком вагона, що рухається, і зони, що простягається на кілька калібрів тунелю позаду і попереду вагона (L_1 і L_3 відповідно) і *близьке поле* – простір L_2 , що безпосередньо прилягає до вагона й не поєднується з далеким полем. Перевагою такого розподілу є те, що далеке поле можна аналізувати як співвідносне з одномірною невстановленою, а близьке – із встановленою течією в системі координат, поєднаного з тілом, що рухається. Обмеження потоку стінками тунелю впливає на близьке поле. Якщо розглядається течія у зоні, достатньо віддалений від носової або кормової частин вагона, умова обмеження простору стінками тунелю передбачає, щоб масова витрата в системі координат, поєднаний з вагоном, була такою самою у перетинах перед вагоном і за ним. Швидкість (або потік кількості руху) щодо вагона повинна бути однаковою, якщо течія нестиснена, або зростаючою, якщо течія стиснута. Наявність чолового опору під час руху обумовлена перепадом тиску на тілі. Така ситуація подібна до випадку із течією, що утворилася в трубі, де сила опору стінок спричиняє падіння тиску за течією і його прискорення (для стиснутої течії).

Потік у кільцевому проміжку і не великою площею між стінками тунелю і вагона, що рухається, буде прискорюватися; до того ж у проміжку можуть виникати числа Маха, що дорівнюють одиниці, при помірних числах Маха перед вагоном. Число Маха перед вагоном, співвідносне з величиною запирання течії в кільцевому проміжку буде максимальним числом, яке може встановлюватися для течії перед вагоном. У разі запирання потоку в кільцевому проміжку умови за вагоном вже не будуть впливати на умови перед ним. Чоловий опір вагона вже не буде безпосередньо обумовлюватися

Тунель має кінцеву довжину й закінчується з обох боків резервуарами з постійним (не обов'язково однаковим) тиском. У випадку натурного повнорозмірного поїзда тунель зазвичай закінчується станцією з атмосферним тиском, унаслідок чого тиск на обох кінцях тунелю приблизно однаковий.

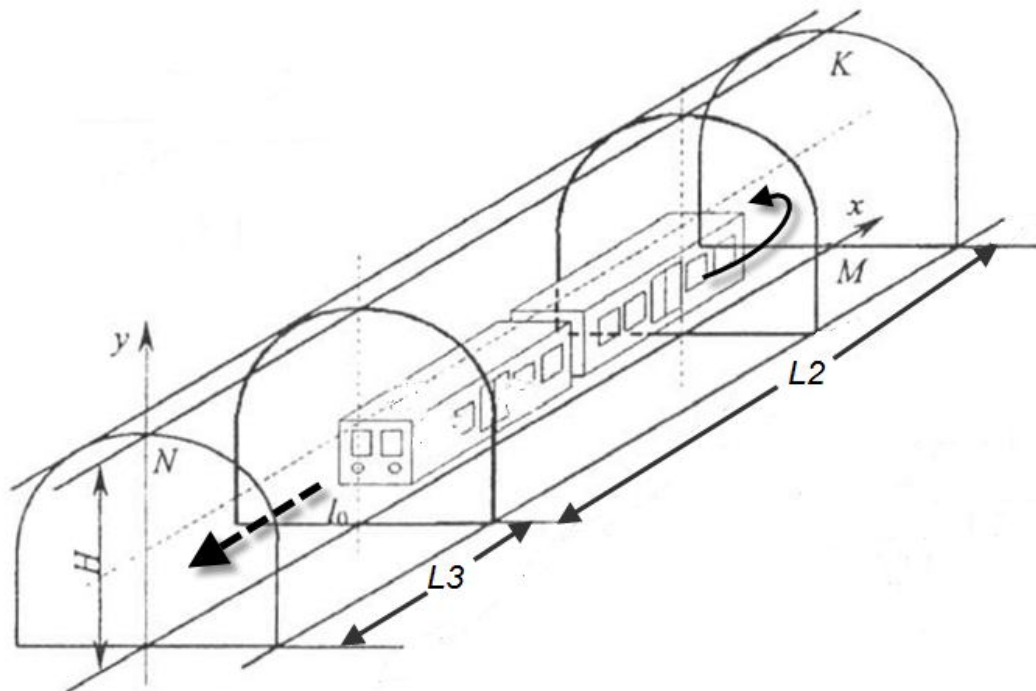


Рисунок 2.2 – Модель взаємодії рухомого складу з повітряним середовищем

Фізична картина взаємодії транспортного засобу з повітряним середовищем убагацькується такою [3, 4]. Під час руху в тунелі, працюючи як поршень, поїзд спричиняє рух повітря в тунелі. Виниклий перед поїздом надлишок тиску витрачається на подолання повітряного опору на передній ділянці тунелю. Виникле за поїздом розрідження витрачається на подолання повітряного опору задньої ділянки тунелю. Різниця тиску перед головним і за останнім вагонами поїзда спричиняє перетікання повітря уздовж проміжку між стінками тунелю й вагонами протилежно щодо напрямку руху.

Водночас сила опору поїзда захоплює повітря в проміжку за напрямом руху [5]. Взаємодія цих двох факторів призводить до того, що в одному випадку в проміжку утворюється попутна течія, а в іншому – зустрічна. На утворення повітряних потоків значно впливають вентиляційні установки. Сумарний потік утворюється внаслідок поєднання двох потоків – потоку від електропоїздів і потоку від вентиляційних установок. Унаслідок різниці температур можуть виникати конвентивні потоки, але вони досить незначні, тому їх можна не враховувати.

У цьому розділі на підставі огляду літературних джерел, присвячених проблемам визначення тягових, енергетичних характеристик, а також характеристик пожежної безпеки рухомого складу в тунелі (зокрема на метрополітенах), обґрунтовується обраний напрям дослідження і визначається мета.

2.3 Визначення мети дослідження

Розглянемо, як взаємодіють рухомий склад і елементи споруд тунелю.

Метою є визначити аеродинамічні характеристики транспортних засобів із урахуванням циркуляційних потоків і місцевих гідравлічних опертів.

У наступних розділах розглянуто завдання тягових розрахунків та завдання оптимізації енергетичних характеристик рухомого складу метрополітену з використанням аеродинамічних характеристик транспортних засобів.

Як базові джерела неоднорідності повітряного середовища розглядаються завдання розроблення методу розрахування аеродинамічних характеристик. Результати наведено в наступній частині.

Завданням тягових розрахунків є встановлення залежностей, які обумовлюють особливості руху поїзда. Різновид руху обов'язково обумовлюється величиною і напрямом рівнодіючої сили, прикладеної до поїзда. Залежність між прискоренням і рівнодіючою силою описується диференціальним рівнянням руху поїзда. Таким чином, завдання зводиться до розв'язання різними методами рівняння руху поїзда, поданого у вигляді задачі Коші.

Беручи до уваги дискретність управління силою тяги, задачу оптимізації доцільно розв'язувати за допомогою дискретного методу динамічного програмування [29–33] в такому порядку.

1. Побудувати оптимальні траєкторії руху потягу $V(S)$, $T(S)$, $N(S)$, які характеризуються мінімальними витратами енергії:

$$A = \int_{S_n}^{S_k} UI \frac{ds}{V} \quad (2.2)$$

де U – напруга на струмоприймачі;
 I – струм потягу;

V – швидкість;
 S – шлях;
 T – час;
 S_n – координата початку руху;
 S_k – координата кінця руху;
 N – позиція управління.

При заданому часі ходу поїзда

$$T_3 = \int_{S_n}^{S_k} \frac{ds}{V}, \quad (2.3)$$

Тобто заданій кількості перемикачів позицій управління для поїзда в разі заданої кількості увімкнень тяги для вагонів метрополітену або електропоїздів

$$K_3 = \sum_{i=1}^M \Delta N_i, \quad (2.4)$$

де ΔN_i – кількість перемикачів позицій управління для увімкнення тяги на i -му кроці, з урахуванням обмеження за швидкістю, допустимого струму й температури двигунів, сили тяги.

Застосувавши метод множників Лагранжа для зменшення розмірності, надамо цільовій функції такого вигляду:

$$R(V_1 \dots V_M, N_1 \dots N_M) = \sum_{i=1}^M A(V_i, T_i, N_i, \Delta N_i) + \lambda_1 \sum_{i=1}^M T_i + \lambda_2 \sum_{i=1}^M \Delta N_i, \quad (2.5)$$

Базове функціональне рівняння буде таким:

$$f_i(V_i, N_i) = \min[f_{i-1}(V_{i-1}, N_{i-1}) + A_i(V_i, T_i, N_i, \Delta N_i) + \lambda_1 T_i + \lambda_2 \Delta N_i], \quad (2.6)$$

де λ_1, λ_2 – множники Лагранжа;
 A_i – витрата енергії на i -ому кроці;
 T_i – час ходу на i -ому кроці.

Для розв'язання задачі шлях потрібно розбити на кроки (кроки змінювання режимів). З кожної точки простору (S, V, N) побудуємо відрізки траєкторій руху на різних режимах ведення поїзда. Змінювання режимів управління поїздом допускається тільки в кінці кроку зміни режимів. Траєкторії руху, що потрапили в одну область простору, порівнюються в кінці кроку зміни за критерієм (2.4), найгірші з них відкидаються. Наприкінці шляху фіксується єдиний оптимальний варіант і відновлюється вся оптимальна траєкторія. Одержані внаслідок розв'язання задачі траєкторії

руху поїзда обумовлюються величинами λ_1 і λ_2 . Варіюючи λ_1 и λ_2 , можна виконати умови (2.3), (2.4).

У разі мінімально можливої тривалості руху оптимізація пошуку оптимальних щодо витрати енергії траєкторій руху поїзда дає значно меншу економію енергії і залежить від заданого часу руху [31–33].

2. Задачу визначення оптимального керування за мінімумом перемикань при заданому часі руху можна сформулювати таким чином. Потрібно обрати такий спосіб керування, тобто таку послідовність режимів управління $N(S)$ і відповідні йому програм $T(S)$ і $V(S)$, за яких перемикань буде найменше:

$$k = \sum_{i=1}^m k_i(S_i, N_i, V_i, T_i). \quad (2.7)$$

За умови заданого часу руху

$$T_3 = \sum_{i=1}^m T_i \quad (2.8)$$

і граничних умов

$$V|_{S=0} = 0; \quad V|_{S=S_k} = 0 \quad (2.9)$$

будемо дотримуватися таких обмежень

$$V \leq V_{\text{дон}}, \quad I \leq I_{\text{дон}}, \quad N_{\min} \leq N_i \leq N_{\max}, \quad (2.10)$$

де S_i – довжина шляху i -ого кроку;

k_i – кількість перемикань позицій управління на i -ому кроці;

N_i – номер позиції управління на i -ому кроці;

$V_{\text{дон}}$ – допустима швидкість;

$I_{\text{дон}}$ – допустимий струм електровоза;

N_{\min}, N_{\max} – мінімальна і максимальна позиції управління.

Оскільки це завдання є ізопараметричним, то для його вирішення застосовують метод невизначеного множника Лагранжа λ [30].

На підставі принципу Беллмана базове функційне рівняння динамічного програмування запишемо так:

$$Q_i(S_i, N_i, t_i) = \min[k_i(S_i, N_i, V_i, T_i) + \lambda t_i + Q_{i-1}(S_i, N_i, T_i)], \quad (2.11)$$

де Q_i – мінімальна сумарна величина критерію оптимізації в кінці i -го кроку;

Q_{i-1} – оптимальне значення величини критерію в кінці $(i-1)$ -ого кроку.

3. Задача оптимального за витратою енергії розподілу часу руху перегонами лінії метрополітену. Потрібно знайти такий час руху перегонами, щоб при заданому часі ходу T_{dil} по ділянці шляху, витрата енергії на всій ділянці була мінімальною:

$$A_{\text{dil}}(T_{\text{dil}}) = \min \sum_{j=1}^m A_j(T_j), \quad (2.12)$$

за умови, що T_j приймає одне з семи можливих значень (відповідно до вимог метрополітену автоматично розглядається для кожного перегону сім траєкторій руху поїзда), кратних 5 с,

$$T_{j1} \leq T_j \leq T_{j7}, \quad (2.13)$$

де T_{dil} – час ходу поїзда по ділянці;

T_j – час ходу на j -му перегоні;

A_{dil} – витрати енергії на всій ділянці для одного поїзду;

A_j – витрати енергії потягом на j -ому перегоні;

m – кількість перегонів на ділянці.

З урахуванням принципу оптимальності Беллмана базове функційне рівняння буде таким:

$$f_j(T) = \min_{T_{j1} \leq T_j \leq T_{j7}} [A_j(T_j) + f_{j-1}(T - T_j)], \quad (2.14)$$

де $f_j(T)$ – мінімум витрати енергії поїздом до кінця j -го перегону;

$f_{j-1}(T - T_j)$ – оптимальна витрата енергії на $(j-1)$ перегонах;

T – час ходу на j -х перегонах.

Базовими характеристиками, які необхідно визначити під час вирішення поставлених завдань, є повітряний опір, створений рухомим складом, і неоднорідності повітряного середовища. Припускається, що з допомогою отриманих характеристик можна покращити техніко-економічні показники, зменшити витрати електроенергії на тягу поїздів, пов'язані зі значними матеріальними витратами; поліпшити санітарно-гігієнічні умови; підвищити рівень обслуговування пасажирів.

3 МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПОВІТРЯНОГО ОПОРУ ПОЇЗДІВ У ТУНЕЛІ З УРАХУВАННЯМ ЗБУРЕННЯ ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА

У третьому розділі досліджено взаємодію рухомого складу з повітряним середовищем. Під час руху в тунелі, працюючи як поршень, поїзд приводить у рух повітря тунелю. Попереду поїзда надлишковий тиск витрачається на подолання опору повітря в його передній частині. Розрідження, яке створюється за поїздом, витрачається на подолання опору повітря у його задній частині. Різниця тиску перед головним і за останнім вагонами поїзда спричиняє перетікання повітря уздовж проміжку між стінами тунелю і вагонами в напрямі, протилежному до напрямку руху. Водночас сила опору поїзда захоплює повітря в проміжку у напрямі руху. Взаємодія цих двох факторів призводить до того, що в одному випадку в проміжку виникає попутна течія, а в іншому – зустрічна. На утворення повітряних потоків значно впливають вентиляційні установки. Сумарний потік утворюється внаслідок поєднання двох потоків. Від електричних потягів з системи вентиляції можуть виникати конвективні потоки, але вони досить незначні, тому їх можна не враховувати.

3.1 Метод визначення повітряного опору транспортних засобів

Транспортні системи, розглянуті в роботах [34, 35], призначені для підвищення швидкості й пропускну здатності транспорту, який використовується сьогодні. Інтерес, що виявляється до швидкісного тунельного транспорту, обумовив необхідність визначити аеродинамічні характеристики системи «вагон – тунель». Під час переміщення поїзда в тунелі умови руху відрізняються від умов вільного руху. Стінки тунелю спричиняють появу двох важливих факторів: обмежують надходження повітря до вагона і обмежують дисипацію виниклих під час руху вагона збурень у трьох вимірах. Проблему ускладнюють чинники, які можна вважати аеродинамічними: збільшення потужності силової установки внаслідок дії сили опору повітря, зростання виділення тепла силовою установкою поїзда й підвищення ступеня дискомфорту пасажирів унаслідок збільшення інтенсивності удару повітряного струменя на станціях підземної транспортної мережі.

Під час руху поїзда сила тертя, удари на рейкових стиках, повітряне середовище тощо, чинять опір його переміщенню. Величину цього опору визначають як суму проекцій на напрям руху всіх зовнішніх сил, що протидіють руху поїзда. Опір руху виникає внаслідок:

- внутрішнього тертя в рухливому складі;
- деформації шляху;
- дії повітряного середовища;
- наявності ухилів й кривих;

– впливу вентиляційних потоків.

Зазвичай перші три різновиди опору поєднують в одну групу й називають основним опором руху поїзда (опір, що зазнає поїзд на прямій горизонтальній ділянці шляху). Опір від підйомів, кривих і вітру називають додатковим опором руху. Його величина залежить від профілю колії, а також від швидкості й напрямку вітру.

В умовах тунелю переміщення повітря, співвідносне з дією вітру на поверхні, яку спричиняють вентиляційні установки. Напрямок повітряного потоку, створюваного вентиляцією, завжди співпадає з віссю поїзда і є попутним або зустрічним.

Головним складником опору руху поїзда є основний опір. Він обумовлюється конструкцією рухомого складу, твердістю шляху й зовнішніми факторами, що визначають умови руху повітряного потоку в тунелі.

Відомі експериментальні й аналітичні методи визначення аеродинамічних характеристик рухомих транспортних засобів.

Звичайний метод аеродинамічних випробувань, при якому опір руху визначається в штучному потоці повітря для нерухомої моделі поїзда, підвішеної в макеті тунелю, виявляється непридатним, тому що відносний рух потоку повітря в тунелі відтворюється принципово неправильно. Під час аеродинамічних випробувань повітря рухається відносно стін тунелю з тією самою швидкістю, що й відносно поїзда. Насправді швидкість цього потоку щодо стін тунелю значно менша, а в проміжку між поїздом і тунелем його напрям може навіть збігатися з напрямом руху поїзда.

Визначити вплив різних факторів на величину опору руху шляхом проведення випробувань, у яких порівняно легка модель поїзда вільно (без тертя) падає у вертикально розташованій моделі тунелю, до кінця неможливо. Навіть якщо модель тунелю порівняно велика, за допомогою такого методу може бути отриманий тільки найнижчий діапазон робочих швидкостей. Ще складнішим виявляється це завдання під час проведення випробування в експлуатаційних умовах, оскільки практично неможливо відтворити в натуральному вигляді всі необхідні конструктивні зміни тунелю й вагонів. У разі проведення випробувань в аеродинамічних трубах експеримент вважається занадто дорогим.

Хоча експериментальні випробування повною мірою і не виявляють особливості впливу на опір руху поїзда окремих факторів, вони надають фактичний матеріал, за яким можна перевірити теоретичні твердження й аналітичні формули для обрахування цього опору.

У разі використання розрахункових методів за допомогою аналітичних формул можна не тільки визначити величину опору руху, але й оцінити економічну доцільність здійснення конструктивних змін рухливого складу й тунелю.

3.1.1 Базові рівняння

З літературних джерел відомо, що запропонована Г. Н. Абрамович [4] розрахункова формула опору повітряного середовища під час руху поїзда в тунелі до певного часу була найбільш обґрунтованою, оскільки теоретично дає найбільше наближення розрахункових значень до експериментальних даних. Ця розрахункова формула має такий вигляд:

$$Q_T = Q_0 \frac{\xi \frac{f}{F_3}}{\left[\frac{(1-\alpha)^{3/2} \sqrt{\xi \frac{f}{F_3}}}{\sqrt{1 + 0,004m \frac{S_6}{F_3}}} + 1 \right]^2} n, \quad (3.1)$$

де $Q_0 = F_3 q_0$ – опір повітряного середовища під час руху поїзда на поверхні, n ;

F_3 – еквівалентна поверхня поїзда, m^2 ;

$q_0 = \rho \frac{v_0^2}{2}$ – швидкісний напір повітряного потоку, що набігає, $\frac{кг}{м^2}$

ρ – масова щільність повітря, $кг \cdot c^2 / м^4$;

$\xi = 1,5 + 0,028 \frac{l_T - L_n}{D_a}$ – коефіцієнт повного опору тунелю;

l_T – довжина тунелю, $м$;

L_n – довжина поїзда, $м$;

$D_a = 4 \frac{f}{u}$ – гідравлічний діаметр, $м$;

f – площа поперечного тунелю, $м^2$;

u – периметр поперечного перетину тунелю, $м$;

$\alpha = \frac{F}{f}$ – коефіцієнт заповнення поїздом поперечного перетину тунелю;

F – поперечний перетин вагона, $м^2$;

S_6 – бічна поверхня (стінки, дах і дно) вагона, $м^2$;

m – кількість вагонів у складі.

Як зрозуміло з наведеної формули, опір повітряного середовища в тунелі Q_T визначається як добуток опору повітря руху поїзда (на поверхні Q_0) на коефіцієнт, величина якого залежить від габаритів тунелю й зовнішньої форми поїзда.

Пізніше, у роботі В. Д. Радченко [5] було встановлено, що недостатня точність розрахункових даних у висновку рівняння (3.1) спричиняється деякими спрощеннями, коефіцієнти тертя повітря з стінками тунелю прийняті без врахування ступеня жорсткості стін (у вираженні коефіцієнта повного опору тунелю ξ коефіцієнт тертя повітря із стінками тунелю прийнятий постійним: $\lambda = \text{const} = 0.028$), а опір від тертя повітряного потоку із стінками вагона визначався без врахування нерівномірності швидкості цього потоку в проміжку між поїздом і стінками тунелю. З метою наближення розрахункових даних до наданих у роботі В. Д. Радченка [4] була запропонована уточнена формула для розрахування повітряного опору поїзда в тунелі:

$$Q_T = f \left[\xi_T \left(1 - \frac{v_T}{v}\right)^2 - \xi_3 \left(\frac{v_T}{v}\right)^2 \right] \rho \frac{v^2}{2 \cdot 3,6^2}, \text{ кЗ}, \quad (3.2)$$

$$\text{де} \quad \xi_T = 1,5 + \lambda \frac{l_T - L_n}{D_2}; \quad \xi_3 = \frac{\alpha(1 + \alpha)}{1 - \alpha}. \quad (3.3)$$

Однак у формулі (3.2) не враховано вплив вентиляційних потоків, втрат на місцевих гідравлічних опорах за всією довжиною активної ділянки, нестационарний характер руху повітряного потоку, тому необхідно уточнити формулу для розрахування опору повітряного середовища під час руху поїзда в тунелі, беручи до уваги збурення повітряного середовища.

Розглянемо як рухаються поїзди в тунелі. Прийmemo наступні припущення.

1. Повітря, що бере участь в циркуляційному потоці всередині тунелю, нестискуване. Справедливість цього припущення підтверджується такою тезою: максимальна швидкість поїзда в метрополітені становить приблизно 90 км/год, що, у разі руху в обмеженому вузькому просторі, відповідає числу Маха ($M \approx 0,18$).

2. Течія в тунелі пояснюється теорією плин рідини в трубопроводах. Це припущення прийняте на тій підставі, що відношення гідравлічного діаметра тунелю до довжини перегону становить від 100 до 600 одиниць. При русі повітряної маси в такому обмеженому у двох напрямках просторі течію можна вважати практично одномірною.

3. Вплив повітряного потоку, створюваного вентиляторними установками, задається як витрата повітря (активного перетину) у площині обертання вентиляторів.

4. Нестационарний характер руху циркуляційних потоків визначається через похідну коефіцієнта тертя повітряного середовища.

3.1.2 Урахування циркуляційних потоків

Для описання впливу збурень повітряного середовища на основні характеристики рухомого складу розглянемо базові співвідношення повітряною опору поїзда і складників руху на різних ділянках тунелю. На рисунку 3.1 зображений поїзд, що рухається в тунелі зі швидкістю v_0 .

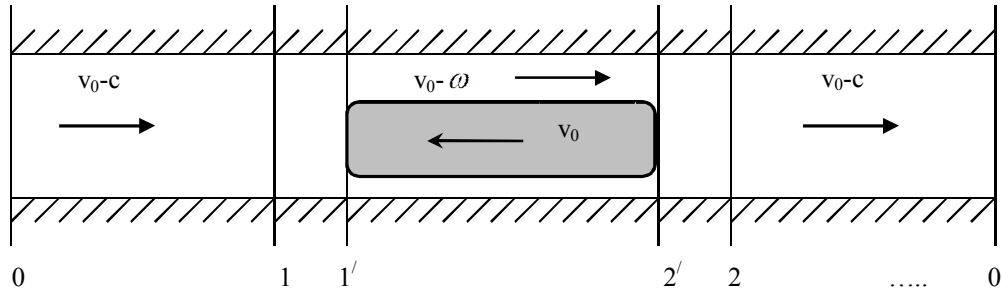


Рисунок 3.1 – Швидкості відносного руху в тунелі

Працюючи як поршень, поїзд спричиняє рух повітря в тунелі, надаючи йому швидкість c . Перед поїздом (перетин 1) тиск більший за атмосферний, до того ж надлишок тиску.

$$h_1 = p_1 - p_0 > 0, \text{ кг/м}^2 \quad (3.4)$$

витрачається на подолання повітряного опору в попередній ділянці (1 – 0) тунелю. За поїздом (перетин 2) має місце розрядження (за рахунок якого долається повітряний опір задньої ділянки (0 – 2) тунелю):

$$h_2 = p_2 - p_0 < 0, \text{ кг/м}^2 \quad (3.5)$$

Різниця тисків перед поїздом і за поїздом спричиняє перетікання повітря уздовж проміжку між стінками тунелю й вагонами у бік, протилежний до напрямку руху. Можливий й такий випадок, коли повітря в зазорі в середньому нерухоме. Інакше кажучи, вектор швидкості повітря в проміжку може мати різні знаки:

$\omega > 0$ – при попутному струмі;

$\omega < 0$ – при протитечії;

$\omega = 0$ – якщо повітря щодо стінок тунелю не переміщається.

Тунельне повітря набігає на поїзд із відносною швидкістю

$$v_T = v_0 - c, \quad (3.6)$$

де c – швидкість повітря тунелю, що рухається в проміжку з відносною швидкістю v_3 .

На відміну від наявних методик у формулу (3.6) додамо складник, що стосується роботи вентиляційної системи $C_{\text{вент}}$, тобто

$$v_T = v_0 - c \pm c_{\text{вент}}, \quad (3.7)$$

де $C_{\text{вент}}$ визначається за формулою (2.1).

Відносна швидкість повітря в проміжку

$$v_3 = v_0 - \omega. \quad (3.8)$$

Протитечія в проміжку виникає, якщо $v_3 > v_0$, а попутна течія, – якщо $v_3 < v_0$.

3.1.3 Урахування місцевих гідравлічних опорів

Повітряний опір поїзда змінюється залежно від руху складу на різних ділянках тунелю [5].

Втрати напору в тунелі або, що те ж саме, перепад тисків перед головним і за останнім вагонами поїзда однакові:

$$h_1 - h_2 = \Delta h_{mp1} + \Delta h_{mp2} + \Delta h_{\text{вх}} + h_{\text{ск}}. \quad (3.9)$$

Опір тертя по довжині вільної частини тунелю такий:

$$\Delta h_{mp} = \Delta h_{mp1} + \Delta h_{mp2}. \quad (3.10)$$

Із огляду на те, що величина визначає опір тертя щодо потоку повітря, спричиненого рухом поїзда в тунелі, можна прийняти, що

$$\Delta h_{mp} = \lambda \frac{l_T - L_n}{D_\zeta} \rho \frac{c^2}{2}, \quad (3.11)$$

де $D_\zeta = 4 \frac{f}{u}$ – гідравлічний діаметр тунелю в м;

λ – коефіцієнт тертя повітря зі стінками тунелю;

l_T – довжина тунелю між станціями, м;

ρ – масова щільність повітря.

В остаточному підсумку вираз щодо втрати напору в тунелі має такий вигляд:

$$h_1 - h_2 = \xi_m \cdot \rho \cdot \frac{c^2}{2} = (\xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{вих}} + \xi_{mp}) \cdot \rho \cdot \frac{(v - v_T)^2}{2}, \quad (3.12)$$

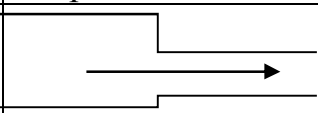
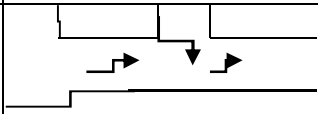
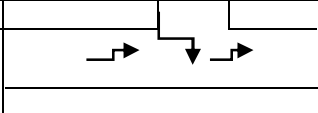
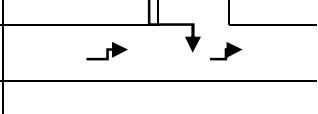
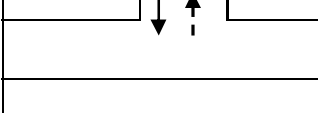
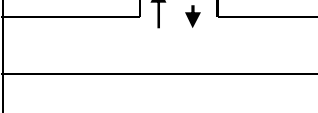
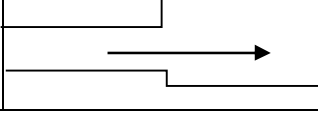
де $\xi_m = \xi_{вх} + \xi_{вих} + \lambda \frac{L_T - L_n}{D_\rho}$ – коефіцієнт повного опору для цього

тунелю;

$\xi_{вх}, \xi_{вих}$ – коефіцієнти місцевих опертів, спричинених різкою зміною конфігурації живого перетину повітряного потоку позаду й попереду складу, що рухається, відповідно.

Необхідно зазначити, що в наявних роботах Г. Н. Абрамовича, В.Д. Радченка величини коефіцієнтів місцевих опертів запропоновано визначати для випадків раптового звуження й раптового розширення потоку ($\xi_{вх} = 0,5$; $\xi_{вих} = 1$; $\xi_M = \xi_{вх} + \xi_{вих}$). Такий підхід не враховує перетікання повітря між паралельними одноколійними тунелями через циркуляційні сполучини, тому величини зазначених коефіцієнтів потрібно визначати для кожного окремо взятого перегону метрополітену. Коефіцієнти визначають на підставі експериментальних даних для певного різновиду зміни геометрії тунелю (раптового розширення, відгалуження під кутом 90° тощо). Такі коефіцієнти називають місцевими гідравлічними опертями. Їхні значення, залежно від геометричних розмірів, наведені в довідниках із гідравліки. Як приклад, у таблиці 3.1 наведено значення цих коефіцієнтів для найбільш поширених випадків.

Таблиця 3.1 – Значення коефіцієнтів місцевих гідравлічних опертів

Ділянка	Джерело збурення	Значення	Схематичне зображення
Вхід у тунель	Раптове звуження	0,5	
Сполучина	Відгалуження	1,0–1,4	
Вентиляційна сполучина (неробоча)	Відгалуження	1,0–1,4	
Вентиляційна шахта (неробоча)	Відгалуження	1,0–1,4	
Вентиляційна сполучина (робоча)	Відгалуження і стік (зима) / джерело (літо)	1,6–1,8	
Вентиляційна шахта (робоча)	Відгалуження і стік (літо) / джерело (зима)	1,6–1,8	
Вихід з тунелю	Раптове розширення	1,0	

Джерелами збурювання повітря є різкі зміни геометрії тунелю (вхід у тунель і вихід із тунелю, вентиляційні сполучини, шахти, горизонтальні поперечини тощо), а також джерела (стоки) додаткових вентиляційних потоків.

3.1.4 Урахування нестационарних особливостей руху повітряної маси

Різниця тисків перед головним і за останнім вагонами поїзда врівноважується опором поїзда Q_T й додатковими втратами у проміжку Q_3 . Отже, величина опору повітряного середовища під час руху поїзда в тунелі визначається за формулою:

$$Q_T = (h_1 - h_2)f - Q_3 . \quad (3.13)$$

Беручи до уваги [4] викладені вище зауваження, формулу можна записати так:

$$\xi_T = 1,5 + \lambda_{невст} \frac{l_T - L_n}{D_z} = f(t), \quad (3.14)$$

де $\lambda_{невст}$ – коефіцієнт тертя під час невстановленого руху повітря в тунелі. Величину $\lambda_{невст}$ пропонується обчислювати так:

$$\lambda_{невст} = \lambda_{ст} + \Lambda , \quad (3.15)$$

$$\text{де } \Lambda = f\left(\frac{dv}{dt}; \frac{d^2v}{dt^2}\right).$$

Тоді величина Q_T може бути встановлена за формулою (3.2), щоб врахувати нестационарність руху повітряного потоку, коефіцієнт ξ_T необхідно визначати за формулою (3.14).

У тягових розрахунках замість величини Q_T використовують безрозмірний коефіцієнт – питомий опір ω_0 .

Основний питомий опір руху ω_0 включає:

- а) внутрішнє тертя в електрорухомому складі (далі – ЕРС);
- б) опір, що виникає внаслідок взаємодії електрорухомого складу, на прямих і горизонтальних ділянках;
- в) опір, що виникає внаслідок взаємодії електрорухомого складу й повітря.

Складність закономірностей і різноманіття явищ, що визначають величини окремих складників основного опору руху, роблять недоцільним і малонадійним метод аналітичного розрахування, тому на практиці

використовують здебільшого формули й коефіцієнти, отримані за допомогою перевірених даних для рухомого складу різних типів.

Застосовані для практичних розрахунків емпіричні формули мають вигляд полінома:

$$\omega_0 = a + b \cdot V + cV^2, \quad (3.16)$$

До того ж кожному типу рухомого складу відповідають певні значення коефіцієнтів a , b , c [4].

Значення коефіцієнтів a , b і c визначають за формулою:

$$a = \omega_m + \omega_{m/o} + \omega_{\text{дв}} + \omega_{\text{пер}} + \omega_n, \quad (3.17)$$

де ω_m – питомий опір руху, створений струмоприймачами;

$\omega_{m/o}$ – питомий опір від тертя в моторно-осьових підшипниках;

$\omega_{\text{дв}}$ – питомий опір, створений механічними втратами у двигунах (тертя в підшипниках якоря, тертя якоря з повітрям, тертя щіток з колектором);

$\omega_{\text{пер}}$ – питомий опір, створений унаслідок втрат у передачі;

ω_n – питомий опір руху, створений унаслідок деформації шляху, тертя у буксах і тощо.

$$b = 0,017; \quad c = \frac{F_{\text{э}} \cdot \rho}{G_{\text{секц}} \cdot m \cdot 3,6^2} \quad (3.18)$$

Однак, у рівнянні (3.16) не враховано зростання основного опору руху під час рушення поїзда.

У роботі [5] розрахування питомого основного опору руху вагонів метрополітену в режимі тяги та гальмування й під час руху поїзда на вибігу запропоновано здійснювати за допомогою таких формул:

– у режимі тяги й електричного гальмування:

$$\omega_0 = 1,1 + \frac{Q_T}{G_{\text{секц}} \frac{m}{2}}; \quad (3.19)$$

– у режимі вибігу (щодо вагонів типу Д):

$$\omega_0 = 1 + \frac{52}{G_{\text{секц}}} = 0,025v + \frac{Q_T}{G_{\text{секц}} \frac{m}{2}}. \quad (3.20)$$

Опір повітряного середовища Q_T у цих формулах необхідно підраховувати за такими показниками: кількість вагонів у складі, тип і середня довжина тунелю між станціями певної ділянки, а також обтічність зовнішнього вигляду складу.

Для електричної тяги прийнято розрізняти поняття й величини опору руху під струмом і без струму. Це обумовлено тим, що під час руху під струмом сили опору, спричинені механічними втратами в тягових двигунах, моторно-осьових підшипниках і зубчастій передачі, не включають до основного опору руху, оскільки ці опори враховують під час розрахування тягових і гальмових характеристик.

У режимі вибігу ці сили додають до основного опору руху. Вирази для визначення питомого основного опору руху поїзда під час руху під струмом і без струму наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Емпіричні формули питомого основного опору руху для різних типів ЕРС*

№ з/п	Тип рухомого складу (ТРС)	Рух під струмом, Н/кН	Рух без струму, Н/кН
1	Електровози	$\omega_0 = 1.9 + 0.01V + 0.0003V^2$	$\omega'_0 = 2.4 + 0.011V + 0.00035V^2$
2	Електропоїзди	$\omega_0 = 1.1 + 0.012V + 0.000267V^2$	$\omega'_0 = 1.24 + 0.02V + 0.000267V^2$
3	Вагони метрополітену	$\omega_0 = 1.1 + (0.09 + 0.022n) \frac{V^2}{mg}$	$\omega'_0 = 1.0 + \frac{52}{mg/n} + 0.025V + (0.09 + 0.022n) \frac{V^2}{mg}$
4	Трамвайні вагони серії КТМ	$\omega_0 = 5.0 + 0.005V^2$	$\omega_0 = 9.0 + 0.005V^2$
5	Трамвайні вагони серії ЛМ	$\omega_0 = 4.5 + 0.0028V^2$	$\omega_0 = 5.0 + 0.0031V^2$
6	Тролейбуси	$\omega_0 = 12 + 0.004V^2$	$\omega_0 = 16 + 0.004V^2$

*Примітка: n – кількість вагонів у рухомому складі; V – швидкість поїзда, км/год. Інші величини надано в прийнятих розмірностях. Питомий опір не включає неоднорідності повітряного середовища за довжиною перегону, оскільки його аеродинамічні форми є недосконалими.

Для порівняльного аналізу повітряного опору ТРС за довжиною перегону застосовано безрозмірний коефіцієнт опору повітряного середовища, що визначається, як і в аеродинаміці літальних апаратів, за відношенням Q_T до добутку швидкісного тиску на характерну площу (площа міделевого перетину):

$$C_x = \frac{2Q_T}{\rho v^2 F} = \frac{1}{3,6^2 \alpha} \left[\xi_T \left(1 - \frac{v_T}{v} \right)^2 - \xi_{\Sigma} \left(\frac{v_T}{v} \right)^2 \right], \quad (3.21)$$

де $a = 3,6^2 \alpha$.

3.2 Обґрунтування достовірності

Результати розрахунків аеродинамічних характеристик системи «вагон-тунель» довели дієвість запропонованої методики. Як приклад на рисунку 3.2 наведено показники залежності опору повітряного середовища Q_T від швидкості v , беручи до уваги певні значення коефіцієнтів місцевих опертів.

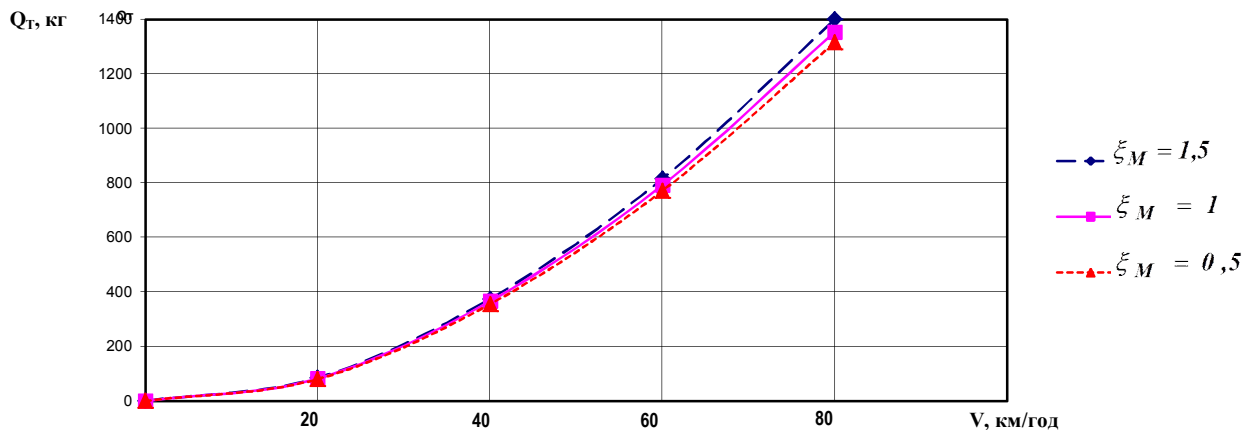


Рисунок 3.2 – Залежність опору повітря Q_T від швидкості поїзда v

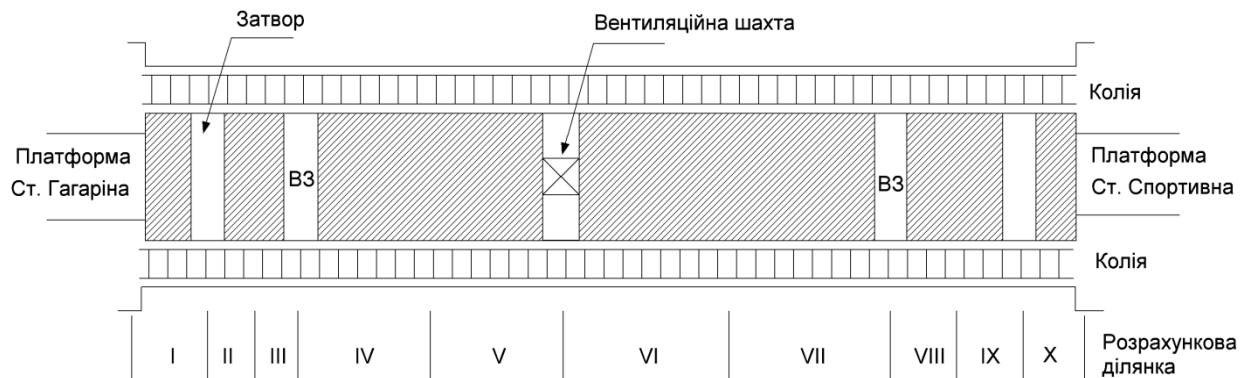
Аналіз наведених на рисунку 3.2 даних свідчить про те, що в разі зменшення значення ξ_T на 0,5 Q_T зменшується до 3 %, а на 1 – до 6 %, що зменшує питомий основний опір руху вагонів. Таким чином, розрахунки, виконані за допомогою наведених формул, доводять, що в умовах метрополітену можна реалізувати заходи, які істотно зменшують питомий опір руху вагонів і забезпечують, відповідно, значне зменшення витрат електроенергії на тягу поїздів.

Потрібно зазначити, що експериментальні роботи щодо впливу місцевих гідравлічних опертів на тягу поїздів у тунелі фактично відсутні. У роботах Є. І. Бикова, Є. М. Сюзумової, Г. О. Романенко [25, 26], присвячених поліпшенню енергетичних показників метрополітенів, наведено тільки певні дані, які не відображають особливостей процесу змінювання опору руху.

Отже, для обґрунтування достовірності запропонованого розрахункового методу визначення повітряного опору поїздів в тунелі було використано дані експериментальних досліджень повного тиску, проведених у 1978 році співробітниками Харківського інституту інженерів транспорту (ХІІТ) на перегоні між станціями «Майдан Конституції» – «Проспект Гагаріна» Харківського метрополітену (рис. 3.3) [36].

На рисунку 3.4 подано показники одержаної залежності швидкості руху від часу за довжиною перегону.

На рисунку 3.5 наведено графіки змінювання повного тиску за довжиною перегону; крива 1 – дані розрахунків за методом В. Д. Радченко; крива 2 – результати досліджень (розрахункові дані); 3 – результати експерименту (ХІІТ). Розрахункові дані було отримано з урахуванням втрат напору за довжиною перегону, які визначалися за формулою (3.14). На цьому рисунку позначено також місця проходження поїздом вентиляційних сполучин, вентиляційної шахти та кінця тунелю.



ВЗ – вентиляційна сполучина

Рисунок 3.3 – Розрахункова ділянка перегінного тунелю між станціями «Майдан Конституції» – «Проспект Гагаріна» Харківського метрополітену

Аналіз результатів досліджень (рис. 3.5) доводить, що розрахункові дані (крива 2) задовільно узгоджуються з експериментальними даними (крива 3). Запропонований розрахунковий метод доцільно використовувати під час визначення впливу повітряних збурень від змінювання геометрії тунелю в місцях розміщення шахти, сполучин тощо.

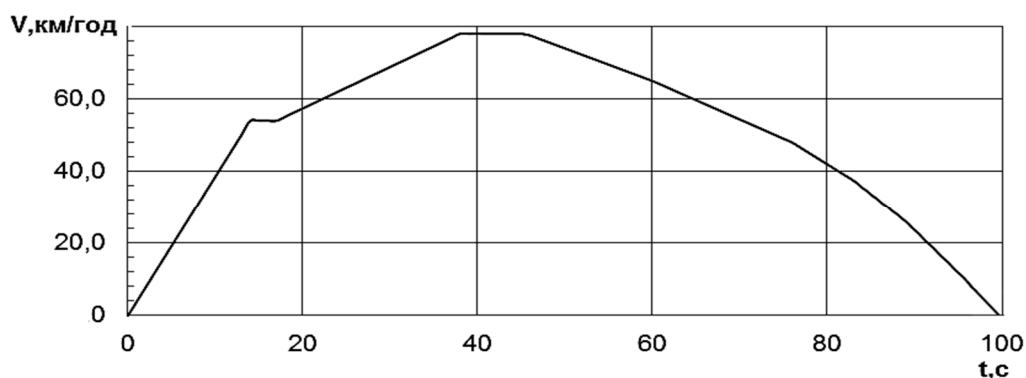


Рисунок 3.4 – Залежність швидкості руху від часу за довжиною перегону

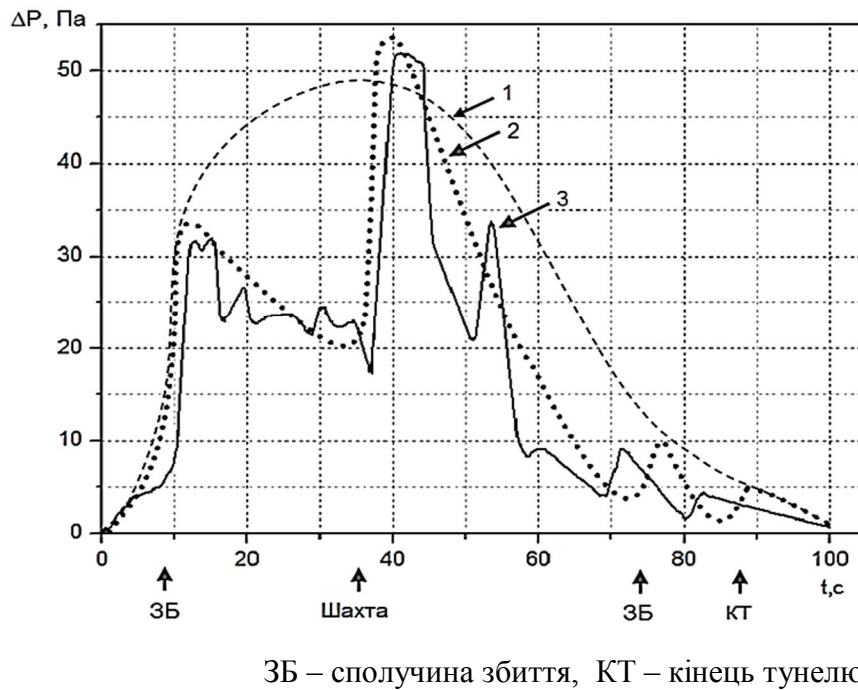


Рисунок 3.5 – Порівняння розрахункових і експериментальних даних розрахування загального тиску в тунелі

Достовірність різниці між відсотковими частками вибірок було оцінено відповідно до критерію Фішера, значення якого становить 1,33 (метод В. Д. Радченко), 1,02 – розрахункові дані. Значення критерію Фішера для розрахункових даних автора є мінімальним, а крива 2 – найбільш наближеною до експериментальних даних.

4 ВПЛИВ НЕОДНОРІДНОСТІ ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА НА ТЯГОВЕ РОЗРАХУВАННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ В ТУНЕЛІ

У четвертій частині наведено удосконалений метод тягового розрахунку поїздів у тунелі. Тягові розрахунки обумовлюються опором руху рухомого складу, який, зі свого боку, залежить від неоднорідності повітряного середовища, що виникає внаслідок змінювання за довжиною перегону геометричних форм тунелів, нерівномірності вентиляційних потоків, нерівномірності пересування рухомого складу. Розглянуто пересування рухомого складу із змінною швидкістю в тунелі, що має різні геометричні форми і розміри поперечних перетинів по довжині. Ця геометрична неоднорідність обумовлена змінюванням перетинів тунелю в місцях вентиляційних сполучин, шахт, входів (виходів) перегонів, розташування комунікацій тощо.

4.1 Тягові характеристики рухомого складу

Рациональність освоєння заданого пасажиропотоку на ділянці метрополітену або напрямі можна визначити за допомогою низки локальних критеріїв. Кожен із них має свою модель перевізного процесу та свої параметри управління. Зазвичай як параметри управління використовують вагову норму, ходову швидкість та базові характеристики тягових засобів. Ці показники, як зазначено в [37], є універсальними для всіх локальних критеріїв. Пояснюється це тим, що вони визначають фізичний і економічний стан перевізного процесу і можуть бути прийняті як базові параметри. Під час визначення раціонального значення будь-якого базового параметра або їхнього раціонального поєднання керуються результатами тягових розрахунків.

Рівняння руху поїзда записують так :

$$\frac{dv}{ds} = \frac{\xi}{v(1+\gamma)}(f_k - w_k - b_k); \quad \frac{dt}{ds} = \frac{1}{v}, \quad (4.1)$$

де S – пройдений потягом шлях;

v, t – швидкість та час руху потяга;

ξ – розмірний коефіцієнт, який визначається за прийнятою системою вимірювання фізичних величин;

f_k, w_k, b_k – відповідно значення сили тяги, опору руху і гальмівної сили, розраховані щодо 1 т маси поїзда;

k – індекс, який для всіх параметрів означає їхнє співвідношення із діаметром обода колеса.

Швидкість і прискорення поїзда регулюються спеціальними перемикальними пристроями, що уможливають змінення схеми з'єднання тягових двигунів і регулювання різних параметрів в їхніх колах, впливаючи

таким чином на силу f_k

Тяговою характеристикою поїзда прийнято вважати залежність $F_k = f_k(v)$ сили тяги поїзда від його швидкості для певної позиції контролера (органу управління перемикальними пристроями), а тяговою характеристикою двигуна – залежність $F_o = f_k(v)$

Для кількісної оцінки ступеня змінювання сили тяги зі зміною швидкості застосовують коефіцієнт жорсткості, а саме:

$$X = -\frac{df_k}{dv} \quad (4.2)$$

Цей коефіцієнт залежить від швидкості v , а отже, і від сили тяги f_k . Щоб зв'язати коефіцієнт X зі значеннями f_k і v , для яких він визначався, користуються коефіцієнтом відносної жорсткості:

$$\chi = \frac{X}{\left(\frac{f_k}{v}\right)} = -\frac{v}{f_k} \cdot \frac{df_k}{dv}. \quad (4.3)$$

Гальмівна сила b_k створюється гальмами – пристроями для уповільнення руху поїзда або для підтримання незмінною швидкості руху на крутих спусках. Залежність $b_k = f_k(v)$ є гальмівною характеристикою поїзда. Ступінь змінювання гальмівної сили щодо швидкості, як і для тягових характеристик, оцінюється такими коефіцієнтами жорсткості;

$$X_T = -\frac{db_k}{dv}, \quad (4.4)$$

$$\chi = -\frac{v}{b_k} \frac{db_k}{dv} \quad (4.5)$$

Для забезпечення надійної роботи тягового двигуна на тягові характеристики накладаються певні обмеження. Щоб визначити траєкторію руху, що забезпечує переведення поїзда з початкового положення в кінцеве за заданих початкових умов, необхідно знати обмеження керуючих змінних у рівнянні руху на заданому інтервалі змінювання швидкості $[0, v_{\max}]$. Найбільш допустиме навантаження тягового двигуна визначається його механічною міцністю, комутаційними умовами. Отже, для тягової характеристики, що співвідноситься з деякою схемою ввімкнення двигуна, на кожному ступені регулювання можна припустити лише певний найбільший струм I_{\max} , що співвідноситься із найбільшою силою тяги $f_{k_{\max}}$. Крім того, тягові

характеристики обмежуються найбільшою допустимою так званою конструктивною швидкістю $v_{к\text{ макс}}$. Ця швидкість визначається або за допомогою пристрою механічної частини рухомого складу, або за розрахунковою міцністю закріплення обмоток і інших частин тягового двигуна.

Інакше кажучи, необхідно знати координати граничної тягової характеристики $\overline{f_k}(v)$ і обмеження гальмівної сили $\overline{b_k}(v)$:

$$0 \leq f_k \leq \overline{f_k}(v); \quad 0 \leq b_k \leq \overline{b_k}(v). \quad (4.6)$$

Метою тягових розрахунків рухомого складу метрополітену є визначення сили тяги поїзда в залежності від його швидкості, що визначають особливості руху поїзда.

Рівняння руху поїзда, як впливає з рівняння руху в режимі тяги (4.7), здебільшого обумовлюється силою тяги F_k

$$G \frac{dv}{dt} = \xi(F_k - W_k), \quad (4.7)$$

або в питомій формі:

$$\frac{dv}{dt} = \xi(f - \omega), \quad (4.8)$$

де G – вага поїзда;

$f = \frac{F_k}{G}$ – питома сила тяги;

$\omega = \frac{W_k}{G}$ – питомий опір руху.

У практиці тягових розрахунків зазвичай використовують показник питомих інерційних і питомих сповільнювальних сил відповідно:

$$f_0 = f - \omega_0 = f(v) \quad (4.9)$$

Для розрахування показників питомих інерційних сил, потрібно поділити ординати тягової характеристики $f_k = f_k(v)$ на вагу поїзда $G[m]$ і від отриманих значень питомої сили тяги

$$f = \frac{F_\delta n_\delta}{G} \quad [\kappa\Gamma / m], \quad (4.10)$$

відняти значення питомого опору руху поїзда на прямому й горизонтальному шляху, тобто питомий опір руху ω_0 буде співпадати з певним режимом руху електровозів.

Під час розрахування зазвичай використовують показники питомої гальмівної сили

$$b = \frac{b_k}{G}, \text{ кг/т} \quad (4.11)$$

і питомої гальмівної сили $b = f(v)$.

Зручніше використовувати характеристики питомих сповільнювальних сил на прямому горизонтальному шляху:

$$b_0 = b + \omega_0 = f(v) \quad \text{або} \quad b_0 = b + \omega_{0x} = f(v), \quad (4.12)$$

де ω_0 – основний питомий опір при включених двигунах або при електричному гальмуванні, а ω_{0x} те саме при пересуванні без струму (вибігу й механічному гальмуванні).

Тягові характеристики обумовлюються опором руху рухомого складу, який, зі свого боку, залежить від неоднорідності повітряного середовища, що виникає внаслідок зміни геометричних форм тунелів, нерівномірності вентиляційних потоків, нерівномірності руху рухомого складу.

4.2 Метод тягового розрахування рухомого складу з урахуванням неоднорідності повітряного середовища

Метою проведення тягових розрахунків є віднайдення залежностей, які обумовлюють особливості руху поїзда [37–39]. Особливості руху визначаються насамперед величиною і напрямом рівнодіючої сили, прикладеної до поїзда. Залежність між прискоренням і рівнодіючої силою описується диференціальним рівнянням руху поїзда. Таким чином, завдання зводиться до розв’язання за допомогою різних методів рівняння руху поїзда у формі задачі Коші. Головними засобами при цьому є лінеаризація нелінійних функцій, застосування принципу малих відхилень змінних стану об’єкта, обчислення поточних координат руху відповідно до методів спостереження.

Тягові розрахунки є прикладною частиною теорії тяги поїздів, вони уможливають вирішення численних практичних завдань, що вирішуються під час проектування та експлуатації електропоїздів.

Криві руху потрібно розрахувати в послідовності, зазначеній у таблиці 4.1.

Приріст часу та шлях для електричного транспорту відповідно обчислюють за виразами:

$$\Delta t = \frac{28,3(1+\gamma)\Delta V}{f_{дс}}, \text{ с}, \quad (4.13)$$

$$\Delta l = \frac{1}{3,6} V_c \Delta t, \text{ м}. \quad (4.14)$$

На підставі таблиці 4.1 і зазначених виразів (4.13), (4.14) розраховують режими пуску, вибігу й гальмування, будуються криві $V(t)$ і $V(l)$.

Таблиця 4.1 – Послідовність розрахування кривих руху

ΔV , км/год	V_n , км/год	V_k , км/год	V_c , км/год	$f_{дс}$, Н/кН	Δl , с	$\Sigma \Delta t$, с	Δl , м	$\Sigma \Delta l$, м
Приріст швидкості задається	Початкова швидкість $V_k = V_n + \Delta V$	Кінцева швидкість $V_c = (V_n + V_k)/2$	Середня швидкість	Знаходять з характеристик питомих діючих сил	Знаходять за (4.14)	$\Sigma \Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_n$	Знаходять за (4.14)	$\Sigma \Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2 + \dots + \Delta l_n$

У разі досягнення потрібної швидкості V_y подальше розрахування здійснюють за виразом:

$$t_y = \frac{3,6l_y}{V_y}, \text{ с}. \quad (4.15)$$

Для побудови кривої вибігу використовують усталену швидкість руху або гальмівну швидкість таким чином, щоб забезпечити задану ходову годину T_x (ходову швидкість V_x) або, якщо ці показники невідомі, величина часу вибігу T_x повинна становити 20 – 25 % від часу руху за перегonom. За побудованими кривими руху потрібно розрахувати окремо для кожного напрямку руху величину середньої швидкості руху V_x за перегonom, пускове прискорення a_n і гальмівне сповільнення a_T за допомогою таких виразів:

$$V_x = \frac{3,6L_x}{T_x}, \text{ км/год}; a_{II} = \frac{V_{II}^2}{2 \cdot 3,6^2 l_{II}}, \text{ м/с}^2; a_T = \frac{V_T^2}{2 \cdot 3,6^2 l_{II}}, \text{ м/с}^2. \quad (4.16)$$

У літературних джерелах під час тягових розрахунків рівняння опору руху визначається за допомогою емпіричних залежностей у вигляді поліномів або за допомогою методик, поданих вище, у яких не враховано неоднорідності повітряного середовища, місцевих гідравлічних опертів, взаємодії вентиляційних та циркуляційних потоків.

Розглянемо переміщення рухомого складу зі змінною швидкістю в тунелі із різними геометричними формами і розмірами поперечних перерізів по довжині. Така геометрична неоднорідність обумовлена змінюванням перерізів тунелю в місцях вентиляційних сполучин, шахт, входів (виходів) перегонів, розташуванням комунікацій і тощо.

Переміщення рухомого складу описується другим законом Ньютона:

$$G \frac{dv}{dt} = F_k - F_{np} - W_o - W_o, \quad (4.17)$$

де F_k – сила тяги (пропульсивна сила);

F_{np} – сила опору, обумовлена інерційністю приєднаних мас повітря;

W_o – основний опір переміщення рухомого складу;

W_o – додатковий опір переміщення рухомого складу.

Сила F_{np} визначається як добуток маси приєднаної повітряної маси і прискорення:

$$F_{np} = \rho \Omega_{np} \frac{dv_T}{dt}, \quad (4.18)$$

$$\Omega_{np} = L_{np} F, \quad (4.19)$$

де ρ – щільність повітря;

Ω_{np} – об'єм приєднаної повітряної маси;

L_{np} – активна довжина ділянки приєднаної маси повітря;

F – площа міделевого перетину вагонів, м^2 .

У разі чисельної реалізації методу загальна ділянка поїзда розбивається на низку елементарних ділянок $[a, b]$, кожна з яких містить не більше одного джерела завихорення потоку (рис. 4.1). Передбачається, що на кожній елементарній ділянці швидкість руху поїзда дорівнює середній швидкості на цій ділянці: $t_i = a + \frac{b-a}{n} i, i = 0, 1, \dots, n$. У роботі пропонується на кожній ділянці шляху виконати чисельне інтегрування:

$$\int_a^b v(t)dt \approx \frac{b-a}{n} \sum_{i=1}^n v\left(a + \frac{b-a}{n}\left(i - \frac{1}{2}\right)\right). \quad (4.20)$$

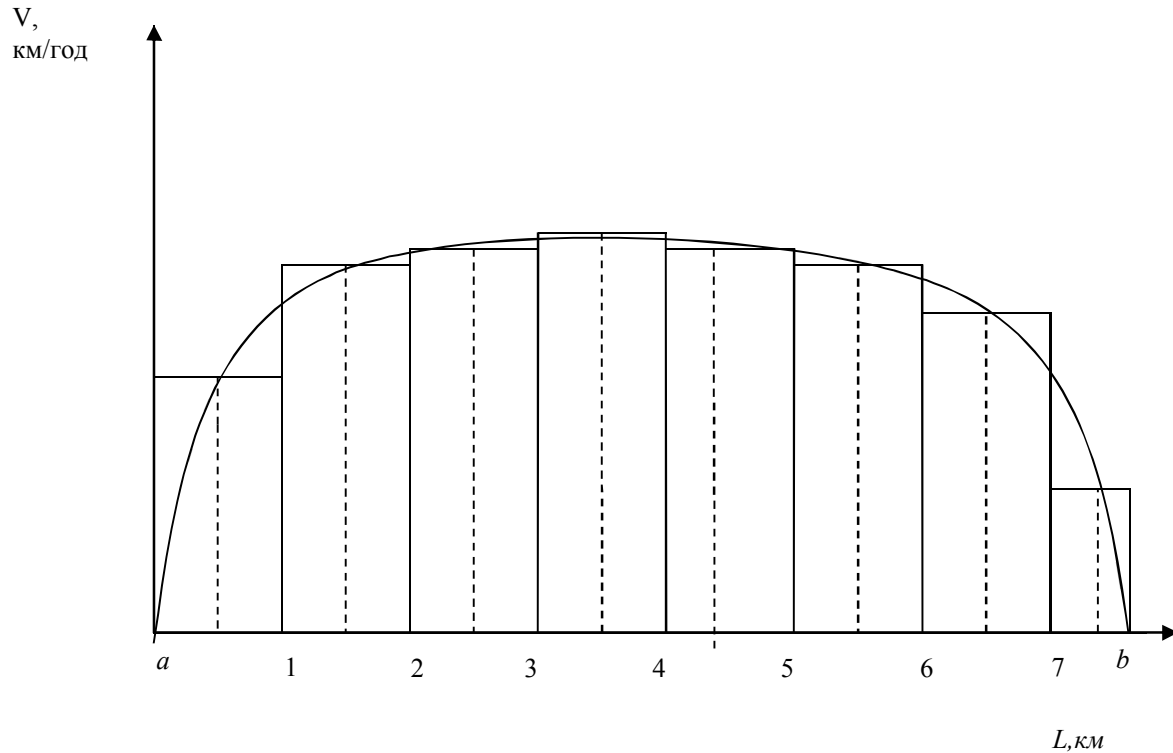


Рисунок 4.1 – Залежність швидкості поїзда v від довжини L

Для урахування неоднорідності повітряного середовища під час проведення тягових розрахунків необхідно, на противагу методу [5], визначаючи аеродинамічні особливості, розглядати тунель з урахуванням реальних геометричних форм тунелю (раптове звуження або розширення, поворот, план і профіль колії), потоків від вентиляційних каналів на кожній елементарній ділянці. Тоді на кожній j -й ділянці втрати напору в тунелі за довжиною перегону визначаються так:

$$\Delta h_j = \xi_{T_j} \cdot \rho \cdot \frac{c_j^2}{2}, \quad (4.21)$$

де c_j – середня швидкість повітря на j -й ділянці;
 ρ – масова щільність повітря;
 $\xi_{вх j} + \xi_{тр j}$ – для ділянки, яка містить вхід у тунель (перегін);
 $\xi_{T_j} = \xi_{вх j} + \xi_{тр j}$ – для ділянки, яка містить вихід з тунелю (перегону);
 $\xi_{M j} + \xi_{тр j}$ – для інших ділянок;
 $\xi_{вх j}, \xi_{вих j}$ – коефіцієнти гідравлічних втрат, спричинених різким звуженням (вхід) та розширенням тунелю (вихід) відповідно;

ξ_{Mj} – коефіцієнти місцевих опертів, спричинені змінювання конфігурації «живого» перетину повітряного потоку позаду й попереду рухомого складу відповідно;

ξ_{mpj} – коефіцієнт тертя повітря об стінки тунелю на j -й ділянці.

Втрати на тертя на j -й ділянці визначаються як сума втрат на тертя при сталому русі і зміні тертя при нестационарному русі:

$$\xi_{mpj} = (\lambda_j + \Delta\lambda_{\text{нест.}j}) \frac{l_j}{D_{ej}}, \quad (4.22)$$

де $D_{ej} = 4 \frac{f_j}{u_j}$ – гідравлічний діаметр перегону тунелю на j -й розрахунковій ділянці в i ;

u_j – периметр поперечного перерізу тунелю, м;

l_j – довжина j -ї розрахункової ділянки тунелю між станціями, м;

λ_j – коефіцієнт тертя повітря об стінки тунелю;

$\Delta\lambda_{\text{нест.}j}$ – складова коефіцієнта тертя, зумовлений нестационарною особливістю руху повітря в тунелі.

Коефіцієнт λ_j обумовлюється якістю поверхні стін тунелю: для гладкої ділянки тунелю – 0,015, для реброваної – 0,038.

Нестационарний додток до коефіцієнта тертя є функцією зміни швидкості і прискорення повітряного потоку на j -й ділянці:

$$\Delta\lambda_j = f\left(\frac{dv}{dt}; \frac{d^2v}{dt^2}\right). \quad (4.23)$$

Отже, втрата напору в тунелі (перегоні метрополітену) визначається як сума втрат на окремих ділянках:

$$h_1 - h_2 = \sum_{j=1}^N \xi_{Tj} \rho \frac{c_j^2}{2}. \quad (4.24)$$

Тоді величина Q_T можна визначити за формулою:

$$Q_{Tj} = f \sum_{j=1}^N \left[\xi_{Tj} \frac{c_j^2}{v^2} - \xi_{3j} \frac{(v - c_j)^2}{v^2} \right] \rho \frac{v^2}{2 \cdot 3,6^2}, \quad (4.25)$$

$$\text{де } \xi_{3j} = \frac{\alpha_j (1 + \alpha_j)}{1 - \alpha_j};$$

$\alpha_j = \frac{F}{f}$ – коефіцієнт заповнення поїздом поперечного перерізу

тунелю j -ої ділянки;

F – поперечний переріз вагона, m^2 .

До того ж для урахування нестационарності руху повітряного потоку коефіцієнт ξ_{Tj} необхідно визначати за формулою, наведеною вище.

Застосовується чисельне інтегрування диференційного рівняння (4.17). У разі чисельної реалізації методу загальна ділянка руху потяга розбивається на низку елементарних ділянок, кожна з яких містить не більш одного джерела завихорень потоку. Передбачається, що на кожній елементарній ділянці швидкість руху потягу дорівнює середній швидкості на цій ділянці.

4.3 Автоматизація процесів управління рухом електропоїздів

У наш час поширення набули програмно-спостерігальні системи автоведення поїзда [40–43]. У метрополітені експлуатуються електропоїзди зі ступінчастим дискретним керуванням сили тяги. Отже, у разі автоматизації процесу ведення поїзда з електровозною тягою під час оцінювання якості автоведення важливо врахувати не тільки точність виконання графіка і витрат електроенергії, але й кількість перемикачів режимів ведення, оскільки внаслідок цього підвищується надійність роботи комутаційної апаратури електровоза й плавність ведення поїзда.

Зі збільшенням пасажиропотоку актуальності набуває завдання ефективної організації руху поїздів. Це завдання вирішується за допомогою алгоритму централізованого управління. На сьогодні на вітчизняних і зарубіжних метрополітенах усе частіше використовуються комплексні системи автоматичного або автоматизованого управління рухом поїздів. Комплексні системи автоматичного управління рухом поїздів метрополітену (КСАУРПМ) і автоматизовані системи управління рухом поїздів метрополітену (АСУРПМ) призначені для збільшення пропускної та провізної здатності ліній, підвищення безпеки руху, економії електроенергії, поліпшення культури обслуговування пасажирів, для виконання заданого обсягу перевезень з урахуванням вимог безпеки й комфорту пасажирів. Забезпечення заданого обсягу перевезень трансформується в дотримання планового графіка руху із заданою точністю при компенсованих збуреннях або в оперативну перебудову графіка при некомпенсованих збуреннях.

КСАУРПМ складається з системи інтервального регулювання, що забезпечує безпеку руху (автоблокування з автоматичним регулюванням швидкості АРШ), системи автоведення поїздів, радіосповіщення пасажирів про поїзд. Система АРШ визначає допустиму швидкість поїзда залежно від місця розташованого попереду поїзда, що рухається, і постійних обмежень швидкості. У разі перевищення поїздом допустимої швидкості здійснюється перехід на вибіг і увімкнення гальмування. У разі зменшення швидкості відбувається перехід на режим вибігу.

Крім зазначених систем, АСУРПМ включає систему диспетчерського управління та диспетчерської централізації.

Системи автоведення поїздів метрополітену (САВПМ), що входять до складу КСАУРПМ і АСУРПМ, здебільшого призначені для підвищення точності виконання графіків руху поїздів. САВПМ, де програма руху поїзда становить залежність часу ходу від шляху на контрольних ділянках, виконують її із заданою точністю. Як контрольні ділянки можуть використовуватися блок-ділянки, межі змінюванні допустимих швидкостей, станції тощо. Отже, у САВПМ фактичний час порівнюється з графіковим частіше, ніж при ручному управлінні.

Підвищення точності виконання графіка руху, що забезпечується САВПМ, уможливорює збільшення використання пропускну здатності ліній. Ще одним важливим параметром ефективності систем автоведення є економія електроенергії. Витрати електроенергії при використанні САВПМ знижуються внаслідок застосування оптимальних щодо цього показника програм руху поїздів, зменшується розбіжність між оптимальними годинами руху за перегонами. Оптимальний розподіл часу руху за перегонами на метрополітені уможливорюють зниження витрат електроенергії на деяких лініях до 4–5%. Однак така економія може бути отримана тільки в разі точного дотримання оптимальних перегінних годин руху, тобто за умови впровадженні САВПМ. Використання в САВПМ досконаліших алгоритмів керування прицільним гальмуванням, що базується на застосуванні мікропроцесорів на борту, дає змогу скоротити час на гальмування, отже, зменшити час руху поїзда із ввімкненими тяговими двигунами і витрати електроенергії на 1-2 %.

Системи автоведення поїздів можуть бути автономними й централізованими. Автономні САВПМ відповідно до заданої програми руху здійснюють управління тільки одним поїздом. Централізовані САВПМ отримують інформацію про параметри руху всіх поїздів на лінії і надсилають команду управління кожному потягу відповідно до отриманої інформації і необхідної програми руху.

Зазвичай системи автоведення будуються централізованими й містять два функційні контури управління – верхній і нижній. Верхній контур обчислює час зупинок і годин руху для всіх поїздів лінії. Вхідною інформацією для нього є графік руху, вимірюваними величинами – час прибуття і відправлення поїздів зі станції і (або) час проходження контрольних точок; вихідною інформацією – обчислена тривалість зупинок і часу руху. Цей контур називають контуром управління рухом поїздів на лінії. Нижній функційний контур забезпечує виконання завдань, що надходить від верхнього контуру, тобто реалізує обчислену ним тривалість зупинок, час руху поїздів, додатково здійснює прицільне гальмування і обіг складів у тупиках. Під прицільним гальмуванням розуміють як виконання швидкісних обмежень у фіксованих точках шляху під контролем системи надання безпеки руху, так і зупинки поїздів на станції в обігових тупиках з необхідною точністю.

Централізовані САВП зазвичай складається з трьох рівнозначних частин: центральний пост управління (ЦПУ), станційні пристрою (СУ), поїзні пристрої (ПУ). Функції управління розподіляються за рівнями системи по-різному. Частина функцій закріплюється за певними рівнями, тоді як деякі функції можуть виконувати різні рівні. Наявність ліній передавання дискретної інформації, використання типових засобів обчислювальної техніки дають змогу перекласти на систему автоведення вирішення низки завдань із інформаційного забезпечення автоматизованої системи управління метрополітемом. САВПМ автоматизують процеси пуску й розгону, обирають режими ведення поїзда по перегону з метою виконання заданого часу руху, забезпечують пригальмовування на вимогу постійного обмеження швидкості, прицільне гальмування біля платформ, відкривання й закривання дверей, увімкнення радіосповіщень, дотримання часу зупинки поїзда. Відомо графікові, інтервальні й графіко-інтервальні алгоритми управління рухом поїздів лінії метрополітену.

Під час входження поїзда на станцію (із релейної шафи системи інтервального регулювання) сигнал з давача прибуття поїзда через станційний пристрій передається на ЦПУ. На підставі інформації про плановий графік і сигнали фактичного прибуття поїзда за 5 с до моменту програмного відправлення поїзда зі станції центрального поста управління надсилається команда, яка кабельними лініями зв'язку передається через шлейф ходу на поїзд. Поїзний пристрій за сигналом «хід» здійснює звукове сповіщення машиніста, увімкнення радіоінформатора, відпускання гальм після закриття дверей, відправлення поїзда. Із підвищенням інтенсивності руху поїздів на метрополітенах потрібно чітко виконувати графік руху в межах 3–5 хв. Відповідно до цих вимог останнім часом, окрім організації МПС, розробляються автоматизовані системи управління рухом поїздів метрополітену. В АСУРПМ поєднано системи диспетчерського управління, диспетчерської централізації, надання безпеки руху, автоведення й зв'язку. АСУРПМ є підсистемою АСУ Метро. Упровадження систем автоведення поїздів метрополітену (рис. 4.2) уможливило зменшення витрат електроенергії на 5–10 % шляхом збільшення чіткості виконання графіка руху, зменшення зайвого гальмування поїздів, застосування раціональних режимів ведення поїздів та зменшення часу на прицільне гальмування біля платформ.

У 1985 р. МІТ спільно з Харківським метрополітемом провели випробування поїзного пристрою системи автоведення поїздів, побудованого із використанням мікро-ЕОМ [43]. Випробування показали працездатність мікро-ЕОМ на борту. Застосування нових законів управління часом руху, за умови використання середньої швидкості і принципу управління прицільним гальмуванням, дали змогу підвищити чіткість дотримання часу руху до 3 с і зменшити витрати на гальмування до 1 с при точності зупинки ± 1 м. Максимально допустима швидкість не повинна бути вищою за задану ні в одній точці перегону. З метою дотримання цієї умови встановлюють дорожні і поїзні пристрої, які, отримавши інформацію з

колійних пристроїв, забезпечують гальмування. Автоматичні пристрої призначені також для функційного контролю за роботою обладнання та його справністю і передають дані в центр управління для прийняття рішення про подальший порядок руху або вилучення вагона з поїзда для усунення несправностей. Автоматичні пристрої здійснюють не тільки контроль за прямованням поїзда, а й передають у центр управління дані про фактичне виконання заданого графіка руху. Постійне автоматичне порівняння запрограмованої і фактичної ситуацій руху здійснюється ЕОМ, яка приймає рішення і передає на поїзд вимоги щодо зміни того чи іншого параметра руху.



Рисунок 4.2 – Пульт вагона моделі 81-717 із встановленою системою автоведення ПА-КСД

Останнім часом поширення набула система винятково автоматичного руху, без машиніста. До того ж диспетчер центрального пункту управління ділянки стежить за посадкою і висадкою пасажирів, за ситуацією у вестибюлях, на ескалаторах і перонах станцій за допомогою телебачення, втручається, якщо це необхідно, процес руху поїздів. У розвинених країнах труднощі з найманням на роботу локомотивних і поїзних бригад і необхідність скорочення експлуатаційних витрат призводять до широкого впровадження систем автоматичного управління рухом поїздів без персоналу на борту. Однак при цьому необхідно проводити додаткові заходи щодо надання безпеки пасажирів у поїздах і на станціях.

4.4 Результати дослідження впливу неоднорідності повітряного середовища на тягові характеристики рухомого складу Харківського метрополітену

У Харківському метрополітені використовуються вагони серії 81-717/714, які були розроблені Митищинським машинобудівним заводом у другій половині 1970-х років. Усі модифікації вагонів здійснювалися на заводах Метровагонмаш (колишній ММЗ) і Вагонмаш (колишній вагонобудівний завод ім. Єгорова). Вагони неофіційно були названі «номерні».

Метровагони моделей 81-717.5М і 81-714.5М є моторними, усі осі вагонів тягові. Вагони розраховані на роботу за системою багатьох одиниць і можуть експлуатуватися в складі поїзда де кількість вагонів – до восьми. Головні вагони 81-717.5М у разі човникової експлуатації рухомого складу встановлюються на кінцях поїзда. Кузови вагонів виготовляються з маловуглецевої сталі й мають суцільнозварну несучу конструкцію. Зовнішня обшивка кузовів для забезпечення підвищеної жорсткості виконується з гофрованих сталевих листів, кузови мають підвищену тепло- й шумоізоляцію. Вагони типів 81-717.5М.714.5М обладнані двома системами вентиляції – природною – припливно-витяжною і примусовою – механічною.

У Харківському метрополітені з 1978 року проводилися комплексні дослідження «дуття» в метрополітенах мілкового закладання, на підставі яких було зроблено висновки щодо послаблення «дуття» на станціях метрополітену. Ідеальним натурним полігоном було обрано станцію «Проспект Гагаріна» з прилеглими до неї перегонами.

Закономірності «дуття» можна встановити, якщо відомо за кожен момент часу тиск і швидкість у різних точках нестационарного потоку повітря, спричиненого рухом поїздів. Із огляду на це було обрано методику безперервного автоматизованого вимірювання та реєстрації миттєвих значень вимірюваних величин.

У роботі [36] наведено результати експериментальних досліджень щодо визначення тиску в тунелях Харківського метрополітену, аналіз яких дає змогу зробити такі висновки:

1. Тиск у тунелях метрополітену є нерівномірним.
2. Нерівномірність тиску найбільше виявляється в районі циркуляційних сполучин і вентиляційних шахт.
3. Найбільші величини тиску спостерігаються в першій половині тунелю, у напрямку руху поїзда, поступово зменшуючись із наближенням до станції.
4. Пряма залежність між швидкістю руху складу й тиском у тунелях спостерігається по довжині не всього тунелю.
5. Найрізкіші перепади тиску спостерігаються після проходження циркуляційних сполучин і вентиляційних шахт у першій половині тунелю, а незначні – у циркуляційних сполучин, які розташовуються перед виходом складу на станцію.

6. Як впливає з розрахунку, імпульс тиску з тунелю на станцію передається зі швидкістю приблизно 140 м/с.

7. Особливості прямого тиску в тунелях не змінюється зі зміною обсягу повітря, що подається через тунельну і станційну вентиляцію, змінюється лише величина тиску.

8. Імпульс тиску з тунелю в центр станції передається зі швидкістю приблизно 140 м/с .

9. Встановлено розбіжність між істинною картиною руху повітря в проміжку між стінками тунелю, у якому рухається поїзд і тунелю з теоретичними, прийнятими раніше показниками. Визначено істинні величини й напрям швидкостей повітряних потоків у безпосередній близькості до стінок рухомого поїзда.

Щоб підтвердити зазначене вище у роботі було проаналізовано результати досліджень. Під час проведення розрахунків отримано показники змінювання повітряного опору поїзда за довжиною перегону з урахуванням локальних місцевих гідравлічних опертів.

На рисунку 4.3 подано порівняльну характеристику залежності опору повітряного середовища від часу без урахування локальних місцевих гідравлічних опертів, із застосуванням наявних і розробленого методів і з урахуванням локальних місцевих гідравлічних опертів (рис. 4.4).

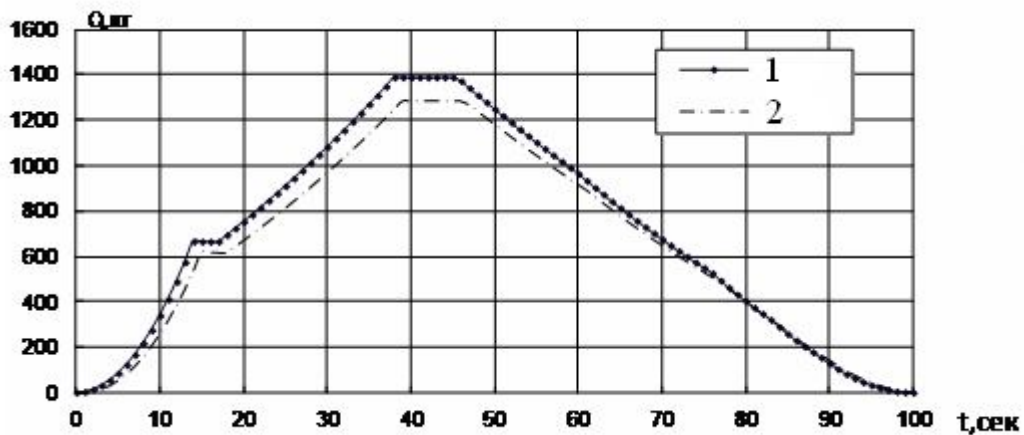


Рисунок 4.3 – Залежність опору повітряного середовища від часу без урахування локальних місцевих гідравлічних опертів:

крива 1 – розрахування за методом В. Д. Радченко;

крива 2 – розрахування за методом Г. Н. Абрамовича.

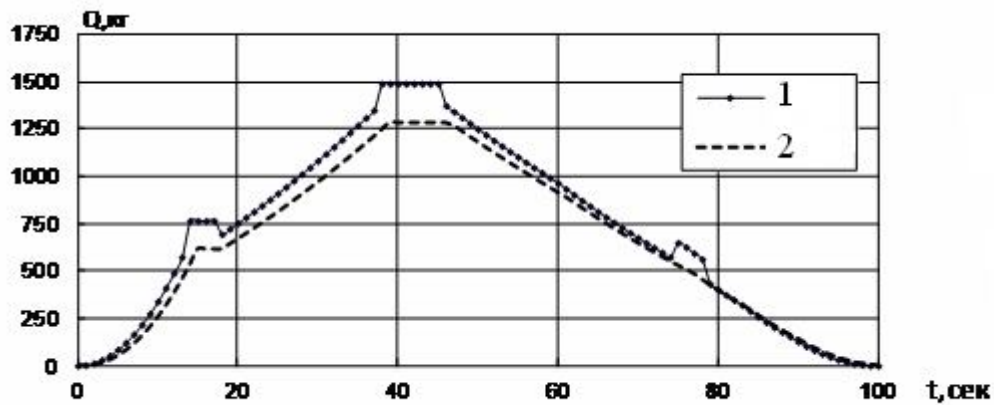


Рисунок 4.4 – Залежність опору повітряного середовища від часу з урахуванням (крива 1) і без урахування (крива 2) локальних місцевих гідравлічних опертів

Аналіз наведених на рисунку 4.4 даних доводить, що неоднорідність повітряного потоку в місцях розташування вентиляційних шахт, а також наявність у тунелі місцевих гідравлічних опертів призводять до змінювання («сплесків») опору повітряного середовища під час руху поїзда в районі входу-виходу в тунель, а також під час проходження поїздом вентиляційних шахт.

5 МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОГРАМ РУХУ ПОЇЗДІВ У ТУНЕЛІ

У п'ятій частині наведено результати дослідження оптимізації руху поїздів у тунелі з урахуванням впливу неоднорідності повітряного середовища на енергетичні характеристики поїзду. Автоматизація поїздів призводить до необхідності визначення програм автоведення поїздів. Якість програм автоведення поїздів за заданого часу руху поїзда визначається за затратою енергії та кількістю перемикачів позицій для поїздів із дискретним управлінням сили тяги і режимів тяги для поїздів метрополітену. Оптимізація програм руху щодо затрати енергії призводить до збільшення кількості перемикачів позицій управління, а зведення до мінімуму кількості перемикачів – до перевитрати енергії. Витрата енергії та кількість перемикачів не рівнозначні за вартістю, пріоритет надається споживанню енергії, але в разі оптимізації програм ведення поїзда необхідно намагатися зменшити кількість перемикачів позицій управління з метою підвищення надійності силової комутаційної установки поїзда. Беручи до уваги дискретність управління силою тяги, поставлене завдання оптимізації вирішується за допомогою дискретного методу динамічного програмування.

5.1 Енергетичні характеристики рухомого складу

У наш час у зв'язку із підвищенням вимог до енергозбереження, у всіх сферах виробництва (зокрема й для тунелів), до тягового забезпечення перевізного процесу ставляться нові вимоги. Метрополітен – один із найенергоємніших пасажирських різновидів транспорту сучасного міста, тому такими актуальними є питання, пов'язані з енергопостачанням. Тягові розрахунки, які використовуються для теоретичного обґрунтування практичних прийомів керування рухомим складом по ділянці, у зв'язку із зазначеним вище повинні здійснюватися із використанням енергооптимальних режимів керування поїздами, забезпечувати швидкість розрахування за декількома варіантами.

У разі використання електричної тяги на переміщення поїзда витрачається електрична енергія, споживана з тягової мережі в період його руху із ввімкненими двигунами. Деяка частка цієї енергії втрачається в тягових двигунах, трансформаторах, перетворювачах і пускових пристроях електричного рухомого складу; її основна частина перетворюється на механічну енергію, що використовується на подолання сил опору руху і створення кінетичної енергії поїзда. Унаслідок накопиченої за час руху під струмом кінетичної енергії поїзд рухається під час вибігання й гальмування. Ця енергія постійно витрачається для роботи сил опору руху, а частина, що залишилася, гаситься в гальмах під час зупинки поїзда.

Таким чином, електрична енергія, що підводиться з контактної мережі до рухомого складу, витрачається на такі складники:

- подолання основного опору руху;
- подолання опору кривих;

- подолання опору ухилів, тобто змін потенційної енергії поїзда;
- втрати в гальмах під час гальмування на спусках;
- втрати в гальмах під час зупинок поїзда або зменшення його швидкості перед змінюванням напрямку руху;
- втрати в тягових двигунах, передавальних механізмах, трансформаторах і перетворювачах;
- втрати в пускових пристроях;
- для власних потреб поїзда: опалювання, освітлення, ланцюги управління і тощо.

Витрата енергії можна розрахувати за кривими струму й потужності поїзда або шляхом безпосереднього обчислення окремих складників.

Відповідно до даних [37], витрати електроенергії на тягу визначаються за інтеграцією в часі споживаної потужності (струмових характеристик):

$$A = \int_0^T P dt \quad \text{або} \quad A = \int_0^T U I_a dt \quad (5.1)$$

де P – миттєве значення активної потужності електровоза;

T – час руху по ділянці;

U – напруга на струмоприймачі;

I_a – активний складник струму електровоза.

Для порівняльного оцінювання витрат енергії визначають питому витрату енергії:

$$A_{yo} = \frac{A}{LG}, \text{ Вт} \cdot \text{год} / \text{ткм} . \quad (5.2)$$

де A – загальна витрата енергії на рух поїзда вагою G , т на ділянці L , км, $\text{Вт} \cdot \text{год}$.

Середня активна потужність, споживана поїздом, буде такою:

$$I_{ea} = \frac{A_{yo} G v}{1000}, \text{ кВт} . \quad (5.3)$$

У разі середнього напруження мережі U_{cp} середній поїздний струм буде постійний при постійному струмі:

$$I_e = \frac{A_{yo} G v}{U_{cep}}, \text{ А} . \quad (5.4)$$

Під час проведення розрахунків припускають, що напруга на струмоприймачі є незмінною і дорівнює номінальній напрузі в мережі.

Розглянемо детальніше наявні методи визначення енергії:

1. Визначення витрат енергії на рух потяга за кривими споживання струму.

Електрична енергія, що витрачається на рух поїзда за певний час T , визначається за допомогою інтеграла:

$$A = \frac{1}{3600} \int_0^T U_c I dt, \quad (5.5)$$

де A – витрати енергії за час T , Вт·ч;

t – час, с;

U_c – напруга на струмоприймачі, В;

I – струм, споживаний усіма ТЕД поїзда, А.

Для порівняльного оцінювання витрат енергії за різних умов його співставляють із певними вимірником, наприклад із 1 т ваги поїзда або 1 км пройденого шляху. Ця питома витрата енергії розраховується за формулою:

$$A_{\text{yo}} = \frac{1}{3600 \cdot LG} \cdot \int_0^T U_c I dt, \quad (5.6)$$

де L – довжина ділянки, на якій визначається витрата енергії, км;

G – повна вага поїзда, т.

Під час розрахунків за формулами (5.5) і (5.6) напругу на струмоприймачі потяга зазвичай приймають незмінною і рівною середньому його значенню за час руху поїзда із ввімкненими двигунами, оскільки із таким самим допущенням будуються криві руху потяга, на підставі яких розраховуються потягові струми. Отже, можна прийняти, що

$$A_{\text{yo}} = \frac{U_c}{3600 \cdot LG} \cdot \int_0^T I dt. \quad (5.7)$$

Таким чином, щоб визначити витрати енергії, необхідно знайти $\int_0^T I dt$, що в деякому масштабі зображується площею, обмеженою кривою $I(t)$ в заданих межах і осями координат, тому одночасно з побудовою кривих $V(t)$ необхідно будувати криві струму поїзда $I(t)$. На кривій струму $I(t)$ необхідно позначити точки переходу від одного з'єднання двигунів до іншого (якщо застосовується перегрупування ТЕД) і з одного ступеня послаблення поля до іншого. Інтеграл $\int_0^T I dt$ можна обчислити так. Криву $I(t)$ розбивають на окремі невеликі інтервали часу $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \dots, \Delta t_n$. Для кожного інтервалу часу Δt_i визначають середній струм I_{ci} . Перемножуючи значення I_{ci} і Δt_i для кожного інтервалу й підсумовуючи отримані значення за весь час T ,

розраховують питому витрату енергії:

$$A_{yo} = \frac{U_c}{3600 \cdot LG} \cdot \sum_{i=1}^n I_{ci} \Delta t_i. \quad (5.8)$$

Якщо криві руху поїзду, а отже, і криві струму побудовані у функції шляху, то криву $I(l)$ розбивають на окремі інтервали Δl_i що співвідносяться з інтервалами шляху, отриманими під час побудови кривих руху. Для кожного інтервалу шляху за кривою $I(l)$ визначають середній струм I_{ci} , а за кривою $t(l)$ – тривалість Δt_i проходження цього інтервалу, й далі за (5.9) знаходимо $A_{уд}$.

Щоб визначити витрати енергії з урахуванням власних потреб потяга, а також на введеннях первинного струму тягових підстанцій, необхідно використовувати вираз:

$$(A_{уд})_п = \frac{1}{\eta_п \cdot \eta_{тс}} \cdot \left[\frac{U_c}{3600 \cdot L \cdot G} \cdot \sum_{i=1}^n I_{ci} \Delta t_i + \frac{P_{сн}}{G \cdot V_c} \right], \quad (5.9)$$

де $\eta_п$ – середній ККД тягової підстанції, що дорівнює 0,94–0,96;

$\eta_{тс}$ – середній ККД тягової мережі, що дорівнює 0,92–0,94;

V_c – середня швидкість повідомлення, визначена з урахуванням зупинок;

$P_{сн}$ – потужність навантаження власних потреб, орієнтовні значення яких надано в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Значення потужностей навантаження власних потреб

Тип рухомого складу	Потужність навантаження $P_{сн}$, кВт
Трамвай	1,5–2,5
Тролейбус	1,5–2
Метрополітен	2,5–3
Моторно-вагонна тяга	15–20
Електровози постійного струму	100–120

2. Визначення витрати енергії на рух потяга за допомогою аналітичного способу.

Питомі витрати енергії на рух поїзда вагою G , т на перегоні завдовжки L , км із заданим профілем розраховується аналітично за таким виразом:

$$A_{уд} = 2,725 \cdot \left\{ \frac{\omega_{ср} + i_3}{\eta_{ср}} + \frac{3,86 \cdot V_{т}^2}{10^5 \cdot \eta_{ср} \cdot L} \cdot \left[\frac{1000(1 + \gamma)}{9,81} - \frac{\omega_{ср} + i_{т}}{a_{т}} \right] + \right.$$

$$+ \left[\frac{1000(1+\gamma)}{9,81} + \frac{\omega_{\text{ср}} + i_{\text{п}}}{a_{\text{п}}} \right] \cdot \frac{3,86 \cdot K_{\text{п}} V_{\text{п}}^2}{10^5 \cdot L} \left\{ \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \text{км}} \right\}, \quad (5.10)$$

де $\omega_{\text{ср}}$ – середнє значення основного опору руху, визначене за кривою $\omega'_0(V)$ для руху без струму зі швидкістю $1,1V_x$;

$\eta_{\text{ср}}$ – середнє значення ККД тягового двигуна, який може бути прийнятий за характеристикою на 1–1,5 % менше за його максимальне значення;

$i_{\text{з}}$ – еквівалентний за витратою енергії ухил.

Коефіцієнт пуску $K_{\text{п}}$ визначається за схемою перемикаання двигуна під час пуску. У разі відсутності перегруповування ТЕД і $z_{\text{д}}=1$, $K_{\text{п}}=1$, за наявності двох або чотирьох двигунів, що перемикаються за два угруповання, $K_{\text{п}}=0,5$. За наявності імпульсного перетворювача, що вмикається на період пуску, замість $K_{\text{п}}$ у формулу (5.11) треба підставити $1-\eta_{\text{пр}}$, де $\eta_{\text{пр}}=0,92\dots0,95$ – середній ККД перетворювача. Величини профілю $i_{\text{п}}$, $i_{\text{т}}$ визначають на пусковій та тормозній ділянках шляху відповідно.

Загальні питомі витрати енергії, що співвідносяться з первинною ділянкою тягової підстанції (з урахуванням питомої витрати енергії на власні потреби) можна подати за допомогою формули:

$$(A_{\text{уд}})_{\text{п}} = \frac{2,725}{\eta_{\text{п}} \cdot \eta_{\text{тс}}} \cdot \left\{ \frac{\omega_{\text{ср}} + i_{\text{з}}}{\eta_{\text{ср}}} + \frac{3,86 \cdot V_{\text{т}}^2}{10^5 \cdot \eta_{\text{ср}} L} \cdot \left[\frac{1000(1+\gamma)}{9,81} - \frac{\omega_{\text{ср}} + i_{\text{т}}}{a_{\text{т}}} \right] + \right. \\ \left. + \left[\frac{1000(1+\gamma)}{9,81} + \frac{\omega_{\text{ср}} + i_{\text{п}}}{a_{\text{п}}} \right] \cdot \frac{3,86 \cdot K_{\text{п}} V_{\text{п}}^2}{10^5 L} + \frac{P_{\text{сн}}}{V_{\text{с}} G \eta_{\text{п}} \eta_{\text{тс}}} \right\}. \quad (5.11)$$

Розглянуті вище методи варто використовувати під час розрахування витрат енергії для однакових напрямів руху. Розбіжність між величинами питомих витрат енергії, розрахованих за кривими руху і за допомогою аналітичного методу, не повинна перевищувати $\pm 10\%$.

Потужності тягового двигуна визначається за допомогою методу середньоквадратичного струму за виразом:

$$I_{\infty} \geq I_{\text{з}} \sqrt{\frac{B_{\infty}}{B_{\text{ср}}} K_{\text{п}} K_{\theta} K_{\text{з}}}. \quad (5.12)$$

Тривалий струм I двигуна за номінальної напруги є паспортною величиною і наводиться для кожного типу ТЕД.

Щоб визначити середньоквадратичний (еквівалентний) струм двигуна $I_{\text{з}}$ за час руху потяга з урахуванням зупинки, необхідно побудувати

допоміжні залежності струму двигуна у функції часу для режиму тяги $I_d(t)$ і реостатного електричного гальмування $I_T(t)$ (рис. 5.1). Залежність $I_d(t)$ отримують як частку значень поїзного струму (залежність $I(t)$) і кількості паралельних груп двигунів ($I = \frac{I}{Z_{II}}$).

Залежність $I_T(t)$ будують з використанням характеристик $V(I_T)$ (рис. 5.2) і кривої руху $V(t)$ для режиму гальмування.

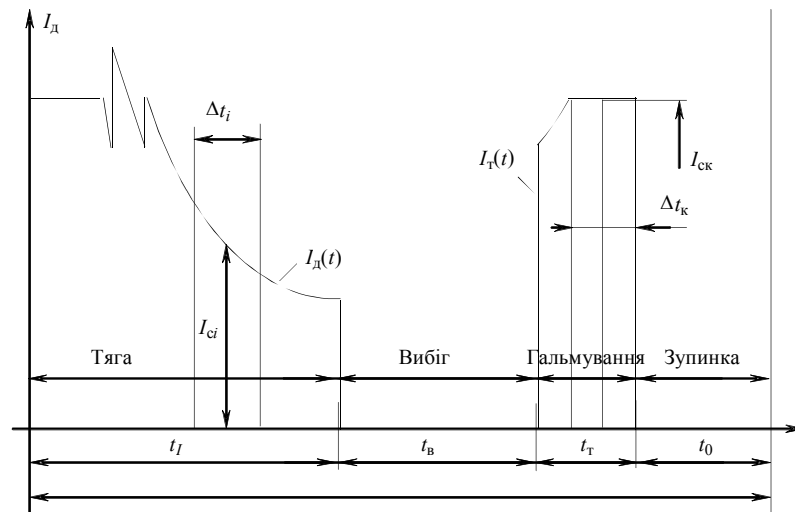


Рисунок 5.1 – Криві струму двигуна

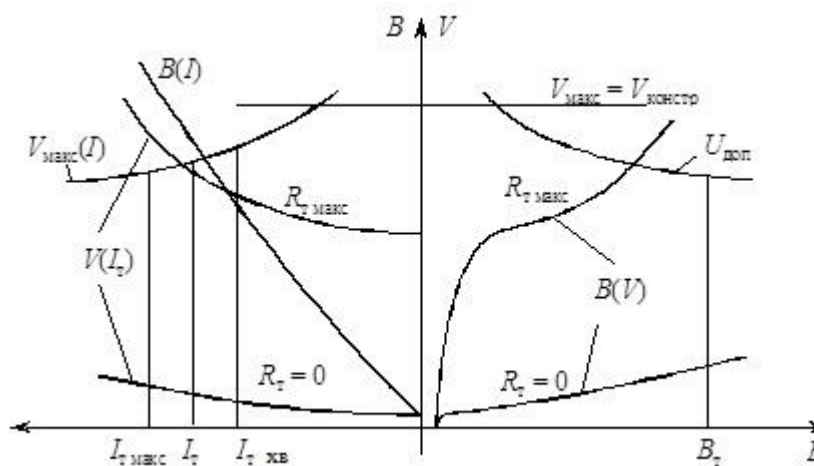


Рисунок 5.2 – Характеристики двигуна послідовного збудження

Середньоквадратичний струм двигуна визначають так:

$$I_3 = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^n I_{ci}^2 \cdot \Delta t_i\right)_{\text{тяги}} + \left(\sum_{i=1}^m I_{ck}^2 \cdot \Delta t_k\right)_{\text{торм}}}{T_x + t_0}}, \quad (5.13)$$

де час зупинки t_0 для електричного транспорту дорівнює 20–30 с.

Відношення тепловіддачі для двигунів з окремою вентиляцією і для двигунів з самовентиляцією $\frac{B}{B_0} = 1$. Тоді

$$\frac{B}{B_{cp}} = \frac{V}{V_c}. \quad (5.14)$$

Швидкість V співвідноситься з тривалим режимом роботи двигуна, визначається за струмом I на підставі швидкісної характеристики для повного поля. Середню швидкість повідомлення V_c для електричного транспорту можна визначити за виразом:

$$V_c = \frac{2 \cdot 3,6L}{T_x + t_0}. \quad (5.15)$$

Значення коефіцієнта K_n , що враховує нерівномірність розподілу навантаження між двигунами, для послідовного збудження – 1,10, а для змішаного – 1,15; у разі наявності одного двигуна на потязі або декількох, жорстко сполучених послідовно $K_n = 1$.

Коефіцієнт K_θ визначається за виразом:

$$K_\theta = \frac{\tau_{\infty}}{\tau_{\infty} + 25 - \theta}, \quad (5.16)$$

де θ – температура навколишнього середовища;

$\tau_{i\infty}$ – допустиме нормоване перегрівання в тривалому режимі, яке обирається відповідно до класу ізоляції (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Допустиме нормоване перегрівання

Клас ізоляції	τ_{∞} в тривалому режимі, °С	$\tau_{нч}$ у варттовому режимі, °С
А	85	100
У	120	130
Е	105	115
F	140	155
Н	160	180

Коефіцієнт запасу K_z повинен дорівнювати 1,1.

Якщо під час перевірки потужності двигуна вона виявиться недостатньою, потрібно змінити режим керування потягу, щоб його потужність була достатньою; якщо вона виявиться надмірною, то необхідно обрати оптимальні способи використання тягового двигуна.

5.2 Базові завдання для розрахування енергетичних характеристик рухомого складу

Дбайливе і правильне витрачання електричної енергії є одним з найважливіших державних завдань, тому велика увага приділяється проблемам раціонального використання електроенергії на транспорті. Електричний транспорт споживає багато енергії, до того ж стосовно енергетичного балансу країни частка енергії, споживана транспортом, безперервно збільшується. Незважаючи на те, що на метрополітені використовуються значно менші швидкості, порівняно з приміським рухом питомі витрати енергії більші й у середньому становлять $50\text{--}70 \text{ Вт} \cdot \text{ч} / \text{т} \cdot \text{км}$. Це пояснюється тим, що відстані між зупинками менші, а основний опір руху в тунелях підвищений.

Головними засобами для зниження питомих витрат енергії на рух поїзда є зменшення основного опору руху шляхом:

- підвищення середнього коефіцієнта корисної дії електрорухомого складу;
- зменшення втрат у гальмах на шкідливих спусках і втрат у них під час зупинок поїзда, а також пускових втрат;
- зменшення втрат енергії в контактній мережі і на тягових підстанціях;
- вплив зовнішніх чинників, що визначають умови руху повітряного потоку в тунелі.

Істотно зменшити витрати енергії можна за допомогою зниження швидкості руху, оскільки в цьому разі зменшується опір руху і втрати в гальмах перед зупинками.

Водіння ЕРС за графіком з найменшими питомими витратами електроенергії можливе лише за умови врахування багатьох чинників. Залежно від ваги й типу складу обмежити швидкість руху за кожен рейс окремо і на тій самій ділянці з ЕРС можна за допомогою різних способів.

Одним із способів є оптимальне управління тяговими двигунами ЕРС із адаптацією їх до зовнішніх умов і режимів руху. У зв'язку з цим розроблення енергозберігальних схем і алгоритмів управління тяговими двигунами постійного струму ЕРС – актуальне завдання.

Поїзд метро має три режими руху: розгін, вибігання, гальмування [32]. Енергія споживається тільки під час застосування динамічних режимів, і щоб мінімізувати її споживання при незмінному повному часі руху по лінії необхідно дуже точно розраховувати динамічні режими приводу й потягу.

Енергія, споживана потягом на тягу, дорівнює сумі потенційної енергії, кінетичної і енергії втрат, до того ж головний складник – кінетична. Якщо у вагоні перебуває 200 осіб, то маса пасажирів становить трохи менше ніж $1/3$ повної маси вагона. Знизити споживання електроенергії шляхом зменшення маси вагона (що здається очевидним) не видається можливим. Знижується його зчеплення з рейкою, а тому необхідно постійно зменшити прискорення розгону й уповільнити гальмування. До того ж, щоб зберегти час руху, необхідно постійно збільшувати швидкість розгону. Отже зменшуючи масу, що є першим ступенем рівняння енергії, потрібно збільшити швидкість, квадрат якої теж є складником рівняння. Звідси випливає, що зменшення піків швидкості при незмінному часі руху – пріоритетний спосіб зниження споживання енергії.

Розглянемо, як цього можна досягнути, які вимоги необхідно поставити щодо роботи тягового приводу, які його параметри необхідно мати.

Кожен вагон метрополітену має чотири двигуни постійного струму послідовного збудження (на кожну вісь по одному двигуну). Управління приводом – реостатне, із ослабленням збудження, схема ввімкнення двигунів – послідовно-паралельна. Спочатку всі двигуни й усі пускові опори ввімкнені послідовно (схема ПС), потім зі збільшенням розгону, коли виведені всі опори, двигуни перемикають на дві паралельні групи за послідовно-паралельною схемою (схема ПП). У кожну групу включені пускові опори, які ступінчасто виводяться. Така схема управління приводом забезпечує його високу динамічність на межі стійкого зчеплення колеса з рейкою, що приводить до зменшення швидкості розгону і, відповідно, зменшення споживання енергії. Закінчують розгін приводу ослабленням магнітного потоку в двигунах шляхом шунтування обмотки збудження індуктивним шунтом і опором у чотири щабелі, що й забезпечує великий динамічний момент на високих швидкостях. Жоден різновид рейкового транспорту не має розгону з таким прискоренням і не гальмується з таким уповільненням, як поїзд метро. Це досягається використанням великої кількості двигунів і складної схеми управління ними. Схема приводу – релейно-контакторна, громіздка, 57 автоматичних вимикачів, ще два регулятори тиристорів напруги для живлення обмоток збудження в гальмівних режимах, декілька десятків контакторів і реле, два двигуни постійного струму для обертання реостатних контролерів (РК), які важать чверть тони кожен, декілька ящиків пускових резисторів, два індуктивні шунти в ланцюзі ослаблення поля вагою по 120 кг тощо. Штатними засобами вимірювання є один давач струму, один вольтметр і по одному давачу швидкості в головних вагонах. Автоматика розподілена протягом усього вагона. Головна частина розміщується в підвагонному просторі в ящиках, частина – в кабіні машиніста [44].

Що більша швидкість розгону на перегоні, то більше енергії спожито, але зазвичай тим менший час руху цим перегonom. Зменшивши час руху на одному перегоні, необхідно використати його на іншому, і не обов'язково на

суміжному. Мінімізувати споживання електроенергії тяговим електроприводом необхідно шляхом визначення оптимальних швидкостей розгону за кожним перегонем так, щоб сумарне споживання електроенергії під час проходження потягом усієї лінії було мінімальним, а час повідомлення між кінцевими станціями дорівнював заданому. Оскільки всі перегони метро мають різну довжину, різні профілі й різне завантаження, то для кожного з них визначається своя швидкість розгону для різних періодів доби. Спроби зменшити споживання енергії, використовуючи спрощені математичні моделі, що не враховують складні фізичні процеси в енергетичних установках і динаміку руху об'єкта, призводять до протилежного наслідку. Замість економії отримуємо перевитрату. Багаторічний досвід експлуатації метрополітену й багаторазове коректування графіків руху дали змогу приблизно визначити оптимальні режими руху. Магнітний ланцюг двигуна для кожного значення швидкості й струму необхідно перераховувати на підставі кривої намагнічування, використовуючи ітераційні методи. Тільки це дає змогу максимально точно розрахувати електромагнітні й електромеханічні перехідні процеси в тяговому приводі, а також такі самі точні розрахунки динаміки поїзда на кожному метрі шляху і максимально точне задавання початкових даних. Комп'ютер уможливорює виконання розрахунків складної математичної моделі з дуже великою точністю. Але така, майже ідеальна, точність розрахунків на практиці неможлива. Потрібно дуже точно розраховувати енергію і час. Енергію тільки в режимі пуску, а час у всіх режимах, навіть на зупинках. Зайвий час, відведений на зупинки, зменшує час руху. Отже, потрібно застосувати велику швидкість, а це енергія. На транспорті час – енергія і гроші.

Було розроблено методики, алгоритми, а за ними й програми моделювання тягового приводу, динаміки поїзда, програми складання баз даних і програми розрахування графіків руху поїздів, оптимальних щодо мінімуму споживання електроенергії для всіх ліній метрополітену [42–45].

Для проведення оптимізаційних розрахунків необхідно мати апаратуру, яка дасть змогу експериментально з високою точністю визначити низку параметрів приводу як початкові дані. Було розроблено методики, алгоритми, а за ними – програми моделювання тягового приводу, динаміки потяга, програми складання баз даних і програми розрахування графіків руху потягів, оптимальних за мінімумом споживання енергії для всіх ліній метрополітену. Задавши початкові дані, під час складання яких спочатку використовували тільки конструкторську документацію на вагон метро, його тяговий привід і проектну документацію на профіль траси і (після внесення до початкових даних результатів талонного обстеження розподілу пасажирів перегонами протягом доби і за чверть години в піковий період). Дослідження проводили в 1997 р. у Київському метрополітені, було додатково отримано приблизно 4–6 % економії за різними лініями. Це стало наочним прикладом необхідності уточнення початкових даних. Зниження піків швидкості

спричинило й зниження механічного зношування рухомого складу: що менша швидкість, то менша енергія взаємодії вагона й шляху. Ця взаємодія включає й удари: менше швидкість – менша сила удару, менше руйнується склад і шлях.

Можливими є три способи вирішення завдання економії електроенергії [44] :

1) постійно уточнювати початкові дані й розрахункову модель, (подібність насичення у цьому разі настане дуже швидко);

2) зменшити споживання енергії на кожному (де можливо) перегоні, знайти локальні екстремуми варіантів, що забезпечують мінімум енергії щодо певного перегону протягом заданого часу руху;

3) для кожного перегону визначити допустимі множини часу і для кожного часу знайти оптимальний варіант за мінімумом енергії.

Лише після цього можна здійснювати глобальну оптимізацію. Початковими даними необхідно вважати оптимальні варіанти, а не варіанти взагалі, як було спочатку. Доречно використати теорію оптимального управління: мінімум енергії забезпечується при постійній швидкості руху. Потрібно зауважити, що тяговий електропривод вагонів метро унеможливує здійснення руху поїзда із заданою постійною швидкістю. Щобільше, схема приводу не дає змогу здійснювати й дискретне наближення до руху з постійною швидкістю. Для дискретного наближення необхідно застосувати багаторазове увімкнення й вимкнення тягового приводу. Практика експлуатації доводить, що зазвичай у разі повторного підімкнення під тягу при великих швидкостях (50 км/год), на тяговій підстанції спрацьовує захист і з цього перегону знімається напруга. Швидко відновити живлення не вдається, доводиться відмінати потяги, а це вже надзвичайна ситуація, що не виправдовується ніякою економією. Теоретично все має відбуватися навпаки: що вища швидкість обертання двигунів, то менше споживається струму з мережі під час їхнього підімкнення. Адже РК пробігає усі 36 позицій, а всі щабелі пускових опертів вводяться і виводяться в тій самій послідовності. Щоправда, вже не як струм, а як час.

Під час розрахування показників пуску потягу насамперед потрібно врахувати змінювання напруги в контактній мережі уздовж шляху за кожним перегonom. На відміну від загальнопромислових приводів, транспортний електропривод працює не при постійній напрузі. Його величина змінюється відповідно віддалення потяга від тягової підстанції і від точок підживлення. Цей параметр відіграє найважливішу роль і впливає на точність визначення часу, шляху розгону й повного часу руху поїзда по перегону. Споживання електроенергії теж потрібно розраховувати на підставі реальних значень напруги, а не за середньою розрахунковою величиною 750 В. Особливо важливо те, що значення просідання напруги спостерігається при одночасному розгоні двох поїздів, що живляться від однієї тягової підстанції.



Рисунок 5.3 – Склад вимірювальної станції

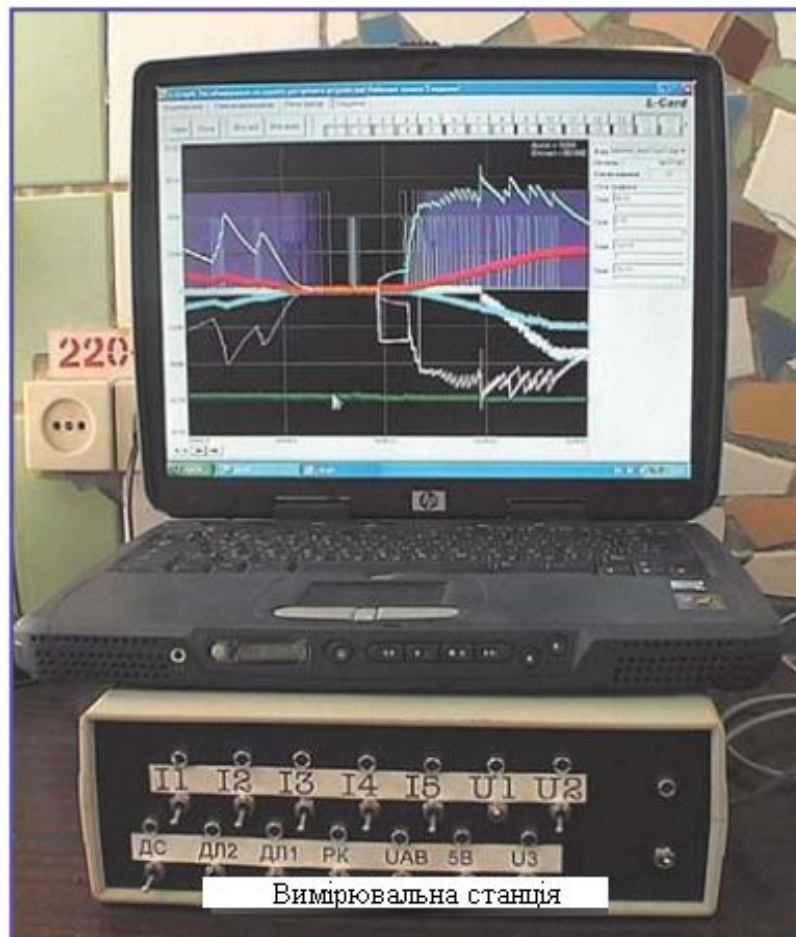


Рисунок 5.4 – Вимірювальна станція

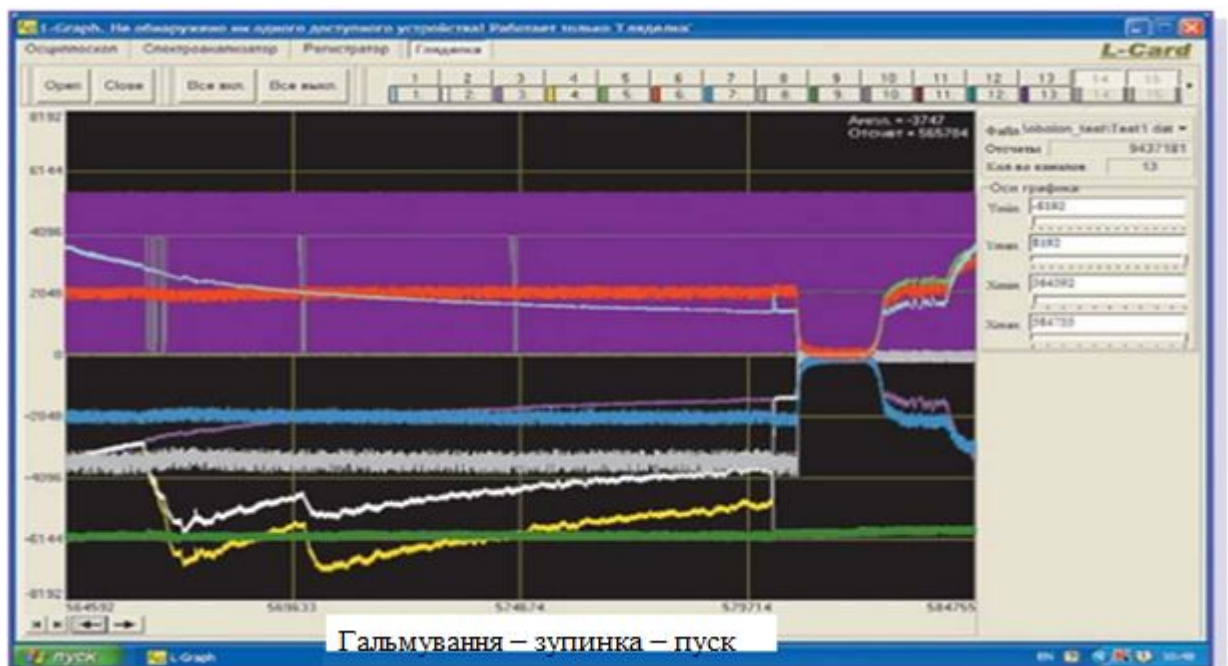


Рисунок 5.5 – Вимірювання параметрів режимів руху

Потрібно визначити ступінь точності індикатора швидкості, за показниками якого машиніст керує потягом. Наявний не відповідає сучасним вимогам щодо точності (особливо в разі великих швидкостей), не враховує ефект буксування коліс, неусувний під час розгону й гальмування двигуна, під час проходження вагоном кривих. Отже, необхідно зробити кінцевий висновок щодо розрахування показників за швидкостями розгону на кожному перегоні для кожної години доби, швидкостей повторних підключень. Отже, вимоги до показчика швидкості повинні бути найвищими. Коли організаційні заходи щодо економії електроенергії будуть замінені технічними, то насамперед потрібно буде замінювати показчик швидкості.

Важливо також врахувати динаміку поїзда. Довжина поїзда метрополітену становить 100 м, він може перебувати одночасно на декількох профілях шляху (підйом, спуск, крива). Кожен профіль характеризується певною величиною опору руху. Необхідно визначити опір руху завантаженого поїзда, під струмом, без струму, у кривих різного радіуса, у кривих типу зигзаг. Це потрібно для точнішого визначення часу руху поїзда. У Київському метрополітені в 2005 році було проведено експерименти щодо вагонів типу 81–717 стосовно впровадження мобільної вимірювальної комп'ютерної лабораторії, що включає блок перетворювачів з АЦП, комплект давачів і сполучні кабелі [44]. Одним із головних завдань створення мобільної лабораторії було експериментальне визначення параметрів електроприводу й опертів руху поїзда з метою підвищення точності початкових даних і використовуваних математичних моделей. Вимірювання проводили у будь-якому вагоні будь-якого депо.

Динамічних систем без відхилень не існує. Це стосується і тунелю. Теоретично можна точно розрахувати оптимальні графіки руху, але визначити рух поїзда, якщо він «збився» з графіка неможливо. Будь-яке відхилення від графіка, яке можна скоректувати, повинна визначати система автоматичного регулювання графіка.

Ідея методу проста. На кожній станції у момент відправлення визначається відхилення від розрахункового графіка і рух по майбутньому перегону здійснюється вже за новим оптимальним графіком для часу руху, що залишився, від поточної станції до кінцевої. На наступній станції знову переходять до нового графіка залежно від часу, що залишився до прибуття на кінцеву станцію відповідно до розкладу. Найкращим для реалізації є режим автоведення. Реалізувати таку замкнуту систему автоматичного регулювання графіка руху, не використовуючи елементи описаної системи, неможливо. До того ж визначальними будуть не елементи силової схеми, а елементи вимірювання швидкості, точність визначення розташування поїзда на лінії. Набір оптимальних графіків сформується на найпершому етапі. Найоптимальнішим щодо цього є такий метод оптимізації, як метод дискретного динамічного програмування. Важливо також уточнити початкові дані, усунути недоліки приводу, знайти локальні екстремуми.

5.3 Граничні можливості метрополітену як транспортної системи з урахуванням впливу неоднорідності повітряного середовища

У наш час спостерігається велике завантаження метрополітену, яке постійно збільшується. У зв'язку з цим усе більшого значення набувають методи й системи управління, які дають змогу оптимізувати споживання енергії електрорухомим складом на тягу. Необхідно розробити нові методи організації руху поїздів і створити високошвидкісний рухомий склад. Зі збільшенням швидкості руху потяга його прискорення зменшується, що пояснюється зменшенням сили тяги й збільшенням опору руху.

Метрополітен є єдиним різновидом міського транспорту, що забезпечує гарантований час поїздки. Його роль зростає зі збільшенням чисельності населення і розширенням меж великих міст. Уразі збільшення швидкості руху поїздів метрополітену вплив повітряного опору на їхні кінематичні й геометричні характеристики посилюється [25].

Для створення швидкісних ліній метрополітену із максимальною пропускною і провізною здатністю необхідно розробити нові вимоги до рівня комфорту перевезень пасажирів, модернізованого дорожнього господарства, нових систем енергопостачання, автоматизованих систем і автоматичних пристроїв управління перевізним процесом [33].

Провізна здатність ліній метрополітену визначається пропускною здатністю станцій і наповненням вагонів метропоїздів, що рухаються один за одним.

Пропускна здатність станції вимірюється кількістю метротягів, що пройшли через неї протягом однієї години, і визначається мінімальним можливим інтервалом між тими метротягами, що рухаються один за одним:

$$\Pi = \frac{3600}{T_{\min}}, \quad (5.17)$$

де Π – пропускна здатність станції, потягів/год;

3600 – кількість секунд у годині;

T_{\min} – мінімальний інтервал між метротягами, с.

Мінімальний інтервал між метротягами, що проходять через станцію визначається часом перебування метротяга в зоні станції і технологічним запасом, необхідним для гарантування безпеки руху метротягів :

$$T_{\min} = t_{\text{эв}} + t_C + t_T + t_{\text{зап}}, \quad (5.18)$$

де $t_{\text{эв}}$ – час евакуації метротягів із станції, с;

t_C – час перебування метротяга на станції, с;

t_T – час гальмування метропотяга в зоні станції, с;

$t_{зАП}$ – технологічний запас часу (складається з часу підходу метропотяга до станції, часу його руху в зоні станції, запасу на технологічну похибку приймальних і дорожніх пристроїв автоматичного регулювання швидкості й автоматичної локомотивної сигналізації АРС-АЛС тощо), $t_{зАП} \sim 15$ с.

Час перебування й час запасу зазвичайно стабільні, тому мінімальний інтервал між метропотягами здебільшого визначається, часом гальмування й евакуації.

Час евакуації – це час від початку руху метропотяга до його повного переміщення за межі станції (до проходження ним в процесі розгону шляху завдовжки приблизно 200 м). Оскільки розгін метропотяга відбувається зі змінним прискоренням, час евакуації визначають за формулою

$$t_{эв} = -\frac{2S_Y}{a_{CP}}, \quad (5.19)$$

де S_Y – шлях розгону до моменту відходу зі станції, м ($S_Y \sim 200$ м);

a_{CP} – середнє прискорення за період розгону метропотяга, м/с².

Час перебування метропотяга на станції t_N регламентовано. У середньому він становить 25 с.

Час гальмування прямо пропорційний швидкості початку гальмування й обернено пропорційний середньому уповільненню за період гальмування:

$$t_T = \frac{V_{HT}}{b_{CP}}, \quad (5.20)$$

де V_{HT} – швидкість початку гальмування метропотяга перед зупинкою, м/с;

b_{CP} – середнє уповільнення за час гальмування, м/с².

Головним різновидом гальмування вагонів метрополітену є електричне гальмування. Для підвищення його ефективності потужність тягових машин у режимі гальмування стосовно режиму пуску збільшують майже в два рази. Це рішення виявилось таким ефективним, що його почали застосовувати під час використання багатьох вітчизняних і зарубіжних вагонів метрополітену. Тягові розрахунки й випробування метропотягів доводять, що внаслідок подвійного форсування потужності під час гальмування середнє уповільнення в діапазоні швидкостей 0 – 70 км/год перевищує середнє прискорення в тому самому діапазоні швидкостей в 1,25 раз. Тобто, з високим ступенем точності можна вважати, що

$$b_{CP} = 1,25a_{CP}. \quad (5.21)$$

Якщо швидкість повідомлення 43–48 км/год, то швидкість початку гальмування метропотягів становить приблизно 70 км/год ($V_{HT} \sim 20$ м/с).

$$П = \frac{180}{\frac{1}{a_{CP}} + \frac{0,8}{a_{CP}} + 2} \quad (5.22)$$

Рівнянням є залежність між пропускною здатністю станції метрополітену і прискоренням (уповільненням), з яким метропотяг розганяється (гальмує) в станційній зоні. Що більше прискорення (уповільнення) метропотягу під час розгону (гальмування), то менше часу він «займає» станцію і більшою є пропускна здатність станцій на його шляху. У таблиці 5.3 і на рисунку 5.6 охарактеризовано залежність пропускної здатності станції від прискорення (уповільнення) метропотяга.

Таблиця 5.3 – Залежність пропускної здатності станції від прискорення (уповільнення) метропотяга

a(b), м/с ²	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
П, потягів/год	21,9	32,3	39	43,8	47,3	50,5	52,9	54,8	56,5

Експлуатованим на сьогодні метропотягам властиві такі середні прискорення в разі розгону до швидкості 60–70 км/год і такі середні уповільнення в діапазоні швидкостей 70–80 км/год (табл. 5.4).

П,
потягів/год

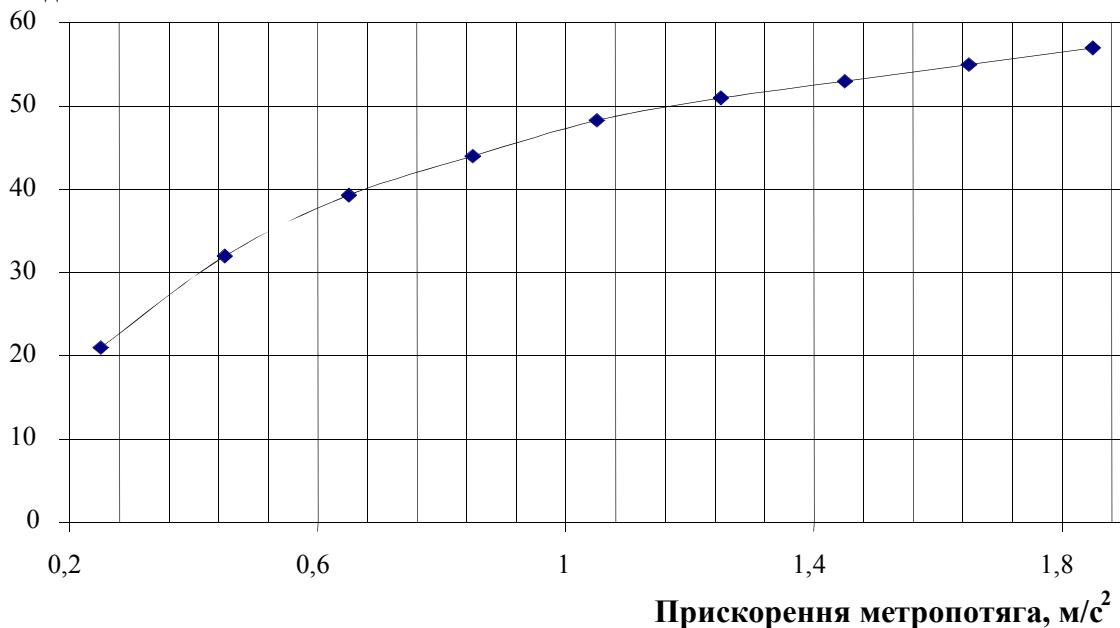


Рисунок 5.6 – Залежність пропускної здатності станції від прискорення (уповільнення) метропотяга

Таблиця 5.4 – Середнє прискорення (уповільнення) метропотягів із вагонів моделей 81.717/714 і 81.720/721 (Яуза)

Модель вагону	Середнє прискорення, м/с ²	Середнє уповільнення, м/с ²
Модель 81.717/714	0,98	1,28
Модель 81.720/721 (Яуза)	0,79	1,11

У залежності прослідковується ефект «насичення»: зі збільшенням прискорення від 0,2 м/с² до 1,2 м/с² пропускна здатність збільшується майже пропорційно до збільшення прискорення (уповільнення), а в разі подальшого збільшення прискорення (уповільнення) темпи збільшення пропускної здатності помітно зменшується.

Підставивши у формулу (5.22) значення прискорення (уповільнення) дані таблиці 5.4, отримаємо, що пропускна здатність станцій метрополітену становить:

- для метропотягів із вагонів моделі 81.717/714 – 47 потягів/год;
- для метропотягів із вагонів моделі 81.720/721 (Яуза) – 43 потяги/год.

У разі експлуатації на лінії метропотягів, що складаються з вагонів із «ідеальними» тяговими й гальмівними характеристиками («ідеальних» вагонів на сьогодні не існує, але технічно їх вже можна побудувати), пропускна здатність станцій метрополітену буде становити 52 потяги/год в одному напрямі. До того ж провізна здатність лінії під час експлуатації на ній семи вагонних метропотягів завдовжки 135 м буде становити приблизно 73 тис. пас./год у одному напрямі, а в разі експлуатації восьми вагонних метропотягів, довжина яких до 160 м – приблизно 83 тис. пас./год в одному напрямі.

Отже можна зробити такі висновки:

1. Середня швидкість поїздки по місту на метро на сьогодні приблизно 22 км/год. У майбутньому вона може зрости до 25 км/год.

2. Провізна здатність ліній метрополітену в разі експлуатації на них восьми вагонних метропотягів на сьогодні становить 75 тис. пас./год в одному напрямі. У майбутньому вона може зрости до 83 тис. пас./год в одному напрямі.

3. З погляду провізної здатності і швидкості поїздки пасажирів по місту метрополітен сьогодні реалізує свої граничні можливості на 90 %.

4. Граничні показники метрополітену як транспортної системи такі:

- швидкість пересування пасажирів по місту — 25 км/год;
- провізна здатність лінії під час експлуатації на ній метропотягів із довжиною до 160 м – 83 тис. пас./год в одному напрямі;
- пікова «п'ятнадцятихвилинна» провізна здатність лінії метрополітену – 112 тис. пас./год у одному напрямі.

5. Метрополітен, як суспільний транспорт, призначений для масових

перевезень пасажирів, за провізною здатністю задовольняє вимоги великих міст XXI століття, але за швидкістю поїздки метрополітен не задовольняє вимоги мешканця великого міста XXI століття [45-51].

Пропускна й провізна здатність метрополітену значною мірою визначають план і профіль шляху. Величина мінімального радіуса кривих визначена за умови забезпечення однакової силової дії рухомого складу на обидві рейкові нитки і дотримання погашеного припустимого прискорення. У разі максимальної швидкості 130 км/год і піднесення 120 мм мінімальний радіус кривої дорівнює 1750 м. Непогашене прискорення при цьому дорівнює нулю. Беручи до уваги, що в міських умовах план лінії дуже обмежений, потрібно застосовувати непогашене прискорення (як на наявних лініях) – $0,4 \text{ м/с}^2$. Тоді мінімальний радіус буде становити 1140 м (стандартний радіус – 1200 м). Тягові розрахунки доводять, що ухили до 30 % забезпечують швидкості руху поїздів до 130 км/год і швидкості повідомлення – 70–80 км/год. Підвищення швидкості руху потребує посилення системи енергопостачання. Тягові розрахунки також доводять, що номінальна потужність двигуна вагонів швидкісних ліній повинна становити не менше ніж 150 кВт, а номінальна напруга в контактній мережі – 1100 В. Переважно застосовується напруга 1500 В, оскільки зменшуються втрати енергії і кількість підстанцій.

Конструкцію шляху обирають, беручи до уваги такі вимоги: безпека руху, зниження рівня вібрації тунельної обробки від руху потягів до меж, що унеможлиблюють вібрацію понад норму в будинках ліній дрібного заставляння, що знаходяться поблизу. Рівень вібрації будівель і споруд, розташованих уздовж трас метрополітенів дрібного заставляння значною мірою обумовлюється швидкістю руху на цій ділянці. Встановлено, що рівень вібрації обробки тунелю зростає на 0,14–0,35 дБ у разі збільшення швидкості повідомлення на 1 км/год, тому необхідно враховувати частотну залежність змінювання максимального рівня віброколиваний тунелю від швидкості руху поїзда й індивідуальних особливостей метрополітену.

У разі великих швидкостей руху зростає частка аеродинамічного складника в повному опорі руху рухомого складу. Під час руху потяг створює повітряний потік, що розповсюджується на деяку відстань від стінок вагонів. Перед поїздом утворюється зона підвищеного тиску, а в хвості потяга – зона розрідження. За високошвидкісного руху дія потоку повітря на потяг і на прилеглі до полотна об'єкти істотно посилюється.

5.4 Оптимізація програм руху рухомого складу з урахуванням неоднорідностей повітряного середовища

Одним з найдієвіших шляхів поліпшення показників експлуатаційної роботи є використання оптимальних режимів ведення потяга. Оптимізація управління може здійснюватися за певними критеріями оптимальності. Під критерієм оптимальності розуміють кількісний показник, що характеризує схвалюване рішення, найчастіше в завданнях оптимізації критерій повинен

дорівнювати мінімальному або максимальному значенню [32, 38, 50].

Зазвичай витрати на перевезення оптимізуються під час виконання тягових розрахунків для вибору типу електрорухомого складу, ваги поїзда, дільничного часу руху, профілю шляху, розташування станцій тощо. Впровадження системи автоведення час руху по перегону задається графіком руху на певній ділянці лінії, відомі тип і характеристики рухомого складу, визначена вага поїзда. У цьому разі критерієм оптимальності керування рухом можна вважати витрати електроенергії на тягу.

Усі вітчизняні електропоїзди не обладнуються регулятором швидкості. На електропоїздах є пристрій автоматичного пуску, перемикач–контролер із однієї позиції на другу, наступну, якщо струм не перевищує вставки токового реле $I_y(N)$ і закінчився встановлений час руху щодо цієї позиції. Якщо $I_o > I_y(N)$, рух потяга на цій позиції продовжується до моменту, коли струм I_o стане меншим за I_y . На електропоїздах метрополітену встановлено пристрій, який автоматично обирає I_y залежно від завантаження вагона – так названий авторежим [37]. Автоматичний пуск застосовується доти, доки не буде досягнута ходова позиція, із використанням якої електропоїзд може рухатися до моменту ввімкнення тягових пристроїв двигуна. Використовують дві ходові позиції: «Хід 2» (повне збудження при паралельному з'єднанні двигунів) і «Хід 3» (остання позиція ослаблення збудження при паралельному з'єднанні двигунів). Керувати електропоїздом можна, змінюючи режим руху, тобто використовуючи тягу («Хід 2» або «Хід 3»), вибіг і гальмування. На більшій частині перегонів метрополітенів використовується трьохрежимний рух поїздів: тяга (зазвичай «Хід 3», іноді «Хід 2»), вибіг, гальмування. У такому разі, тобто при одному ввімкненні тягових двигунів, кожному значенню часу руху по перегону відповідає одна траєкторія руху, а розрахунок програми зводиться до вибору координати точки, у якій вмикають тягові двигуни. Під час побудови графіків руху, які визначають програмний час руху по перегону T_x , усі значення T_x повинні становити 5 с, наприклад для метрополітенів. Отже, для перегонів, на яких відбувається одне ввімкнення тягових двигунів, не потрібно вирішувати проблему оптимізації керування, а визначення програми руху зводиться до вибору координати точки вимикання двигунів при заданому значенні T_x , що дорівнює 5 с. Програма розроблена, на підставі вимог до метрополітену, для кожного перегону враховує сім траєкторій руху потягу з часом ходу, кратним 5 с, у діапазоні від T_x^{\min} до $T_x^{\min} + 30$ с. До того ж на деяких перегонах метрополітену рух потяга із режимом «Хід 3» призводить до швидкого досягнення допустимої швидкості v_d , при цьому необхідно перейти на вибіг та програмний час ходу T_x , що не виконується. Рух на такому перегоні в режимі «Хід 2» і перехід у деякій точці до режиму «Хід 3» дає змогу рухатися із швидкістю нижчою допустиму, розігнатися до більшої швидкості і цим зменшити час ходу по перегону. На більшості

перегонів метрополітену (приблизно 20–30 %) для реалізації заданого часу ходу за графіком застосовується багаторазове ввімкнення тягових двигунів – 2–3 рази.

Розглянемо детальніше питання щодо визначення оптимальних програм руху потягу із мінімальною витратою енергії при заданому часі ходу. Визначення програми руху поїзда для заданого часу ходу є багатоваріантним завданням, оскільки траєкторії руху поїздів із однаковим часом ходу, але різною витратою енергії не співпадають. У цьому разі для визначення програми руху потрібно знати оптимальну за витратою енергії траєкторію, що відповідає заданому програмному часу ходу. У [31–33] доведено, що якщо можна на перегоні дотримуватися заданою часу руху при одному ввімкненні тягових двигунів і не перевищуючи допустимої швидкості, то такий режим є оптимальним. Це пояснюється тим, що при кожному повторному ввімкненні двигунів ведення поїзда на реостатних позиціях призводить до втрати енергії в реостатах.

На метрополітенах використовують режими руху з мінімальною можливою кількістю ввімкнень тягових двигунів, при якому можна реалізувати заданий час руху по перегону. Що менша кількість перемикачів режимів управління поїздом, за якого можна виконати заданий час руху, то простіше реалізувати ці програми. Під кількістю перемикачів режимів управління електропоїздом розуміють кількість переходів з режиму «Хід 2» на «Хід 3», з тяги на вибіг і з вибігу на тягу. Отже, під час розрахування оптимальних програм потрібно враховувати обмеження на кількість перемикачів режимів ведення поїзда.

Вибір енергооптимальних режимів управління рухом потягу здійснюється за допомогою дискретного варіанта методу динамічного програмування, який передбачає великі витрати машинної пам'яті. Завдання визначення оптимальної траєкторії руху рухомого складу внаслідок застосування дискретного позиційного керування силою тяги електропоїзда є багатоваріантним завданням. Дискретизація керування силою тяги уможливорює дискретизацію керування по шляху, тобто змінювання позицій керування здійснюється через деякі кроки протягом руху поїзда. Специфіка цього завдання подібна до специфіки дискретного динамічного програмування, що полягає в розподілі обчислювального процесу на низку послідовних кроків m . Час руху поїзда T , задається графіком руху.

Під час визначенні залежності $v(S)$ необхідно обов'язково враховувати:

- режим руху потяга (тяги, неробочий хід або гальмування);
- особливості змінювання швидкості руху потяга залежно від профілю шляху, тобто крутизну ухилів;
- величини питомих прискорювальних і уповільнювальних сил.

Беручи до уваги зазначене, режим руху обираємо залежно від необхідності збільшення або зменшення швидкості та можливих її обмежень. Наприклад, під час відправлення поїзда зі станції для збільшення швидкості

або для подолання елементів профілю шляху із великою крутизною підйому застосовують режим тяги. Режим неробочого ходу використовують зазвичай у випадках, коли подальше використання режиму тяги супроводжується збільшенням швидкості руху поїзда понад допустиму, а також перед і після увімкнення гальм, тобто до і після ввімкнення режиму тяги. Режим гальмування використовують у разі зниження швидкості або за необхідності зупинити поїзд. У будь-якому разі інтервал змінювання швидкості під час побудови залежності не повинен перевищувати 10 км/год. Допустима швидкість руху обмежується станом шляху, гальмівними засобами поїзда, конструкцією локомотива й вагонів. За максимально допустиму швидкість руху відповідно стану шляху приймемо швидкість, що дорівнює 80 км/год. Розташування крапки-полюса на осі питомих прискорювальних і уповільнювальних сил визначається величиною ухилу цього елемента профілю шляху. У початковий момент часу поїзд в режимі тяги рушає зі станції А, його початкова швидкість дорівнює 0 км/год. Отже, початкова точка 0 кривої швидкості $v(S)$ відома – вона розміщується на початку осі (станція А). Потім на осі швидкості v діаграм питомих прискорювальних і уповільнювальних сил обираємо інтервал змінювання швидкості руху поїзда від $v_n = 0$ км/год до $v_k = 10$ км/год. Вважається, що при зміні швидкості поїзда в інтервалі від v_n до v_k прискорювальна сила постійна і відповідає середньому значенню швидкості.

Крива струму $I(S)$ як функція струму від пройденого поїздом шляху, необхідна для розрахування нагрівання обмоток електричних машин потягів, а також для визначення витрати електроенергії на тягу електрорухомою складом. Крива струму $I(S)$ як функція струму від шляху, будується тільки в режимі тяги з використанням кривої $v(S)$ і струмових характеристик $I(v)$ потягів.

Методика побудови кривої струму зводиться до такого. На кривій швидкості $v(S)$ визначаємо значення швидкості v руху потяга. За струмовою характеристикою знаходимо величину струму, що відповідає швидкості. На вертикальних лініях, що проходять через точки перетину кривої швидкості, в обраному масштабі наносимо точки, відповідно до величин струмів, визначених за струмовими характеристиками. Отримані точки сполучаємо прямою лінією, яка утворює криву струму $I(S)$. Під час побудови кривої струму головного генератора потяга враховуємо також перемикання держака контролера-машиніста з позиції на позицію; цей перехід з позиції на позицію позначаємо на кривій струму головного генератора. Криву струму будуємо тільки тоді, коли поїзд рухається в режимі тяги. У режимах неробочого ходу і гальмування струм не використовується і крива $I(S)$ обривається до нуля, а там, де режим тяги вмикається знову, показник струму відповідає швидкості руху електропоїзда. Витрати потягом електроенергії на тягу визначаються за допомогою побудованих кривих часу і струму за формулами, вказаними у [37] для відповідного різновиду тяги.

Завдання пошуку оптимального режиму ведення потяга вирішується за допомогою варіаційних методів, основи яких розроблено Е. Ейлером і Ж. Лагранжем, розвинуті в динамічному програмуванні Р. Беллмана і «принципі максимуму» Л. С. Понтрягіна [29].

У роботах [29, 30] на підставі використання принципу максимуму Л. С. Понтрягіна доведено, що в завданнях оптимального прискорення тіл з найбільшим перетворенням підведеної електричної енергії в кінетичну енергію тіла в разі обмеження на величину гранично допустимого струму оптимальною функцією струму є постійна функція, що дорівнює гранично допустимому значенню. Отже, режим постійного струму є оптимальним у завданнях щодо розгону тіл з максимальним ККД, а також з мінімальними енергетичними втратами.

Автоматизація ведення поїздів призводить до необхідності визначення програм автоведення поїздів. Якість програм автоведення поїзда при заданому часі руху потяга визначається витратою енергії на тягу потягів і кількістю перемикачів позицій управління для потягів з дискретним управлінням, силою тяги і кількістю перемикачів режимів тяги для потягів метрополітену. У роботі [32] доведено, що оптимізація програм руху щодо витрати енергії призводить до збільшення кількості перемикачів позицій керування, а мінімізація кількості – приводить до перевитрат енергії. Витрати енергії і кількість перемикачів не рівноцінні за вартістю, пріоритетними вважаються витрати енергії, але потрібно їй намагатися під час розрахування програм ведення потяга скоротити кількість перемикачів позицій управління з метою підвищення надійності силової комутаційної апаратури локомотивів.

На підставі зазначеного розробляється стохастична модель. Завданням моделювання є розрахування траєкторії руху поїзда, базових параметрів руху, заданого й фактичного часу руху по перегону, витрати електроенергії для заданих параметрів перегону (профілю, кривих, допустимої швидкості) і руху (координати першого вимкнення тягових двигунів, другого ввімкнення тягових двигунів, кроку інтеграції, кількості ввімкнення тягових двигунів, автоматичного режиму управління рухом).

Оптимальність моделі систем управління обумовлюється точністю апроксимації характеристик рухомого складу.

У довідковій літературі подано тягові й електромеханічні характеристики для номінальних значень напруги на двигуні. Ці характеристики не можна використовувати в моделях руху потягів, у яких досліджується процес для напруги, що відрізняється від номінальної. У таких моделях використовуються характеристики магнітного потоку двигуна від його струму $C\Phi(I_\delta)$, які розраховуються за характеристиками $V(I_\delta)$.

Магнітний потік двигуна визначають за формулою:

$$C\Phi(I_\delta) = \frac{U_p - R_\delta \cdot I_\delta}{V}, \quad (5.23)$$

де U_p – розрахункова номінальна напруга на двигуні;

R_δ – опір двигуна;

V – швидкість поїзда;

I – струм двигуна.

Характеристика $C\Phi(I_\delta)$ фактично не залежить від напруги на двигуні.

Далі характеристика $C\Phi(I_\delta)$ розподіляється на z -відрізків і на кожному відрізку здійснюється лінійна апроксимація:

$$C\Phi_z = a_{0z} + a_{1z} \cdot I_\delta, \quad (5.24)$$

де a_{0z} , a_{1z} – коефіцієнти апроксимації z -го відрізка характеристики залежності магнітного потоку від струму.

Коефіцієнти кусочно-лінійної апроксимації визначають за такими формулами:

$$a_{0z} = \frac{C\Phi_z I_{z+1} - C\Phi_{z+1} I_z}{I_{z+1} - I_z}, \quad (5.25)$$

$$a_{1z} = \frac{C\Phi_{z+1} - C\Phi_z}{I_{z+1} - I_z}, \quad (5.26)$$

де $C\Phi_z$, $C\Phi_{z+1}$ в z -ої і $(z+1)$ -ої точках характеристики.

Похибку апроксимації розраховують за формулою

$$\Delta = \frac{(C\Phi_z - C\Phi_{za})}{C\Phi_z} \cdot 100 \% \quad (5.27)$$

де $C\Phi_z$ – фактичне значення магнітного потоку;

$C\Phi_{za}$ – апроксимоване значення магнітного потоку.

Залежність сили тяги двигуна від струму кусково-лінійно апроксимується:

$$F_\delta = b_{0z} + b_{1z} \cdot I_\delta, \quad (5.28)$$

Коефіцієнти кусково-лінійної апроксимації визначаються за формулами:

$$b_{0z} = \frac{F_z I_{z+1} - F_{z+1} I_z}{I_{z+1} - I_z}, \quad (5.29)$$

$$b_{1z} = \frac{F_{z+1} - F_z}{I_{z+1} - I_z}. \quad (5.30)$$

Сила тяги двигуна визначається за кусково-лінійними апроксимованими характеристиками двигуна (5.29). До того шляхом вирішення системи рівнянь (5.25) і (5.26) обчислюється струм двигуна I_δ :

$$I_\delta = \frac{U/2 - a_{0z}V}{a_{1z}V + R_\delta}, \quad (5.31)$$

де U – задана (фактична) напруга на струмоприймачі вагона.

Розглянемо математичну модель руху поїзда.

Для моделювання руху поїзда використовується рівняння руху поїзда, у якому швидкість V , шлях S і час T поєднуються в диференційному вигляді.

Інтегрувати рівняння руху поїзда можна за шляхом, часом або швидкістю. У цій роботі під час розрахування траєкторій руху незалежною змінною обрано шлях S .

$$\frac{dV}{dS} = \frac{K}{V} \left(\frac{F}{m_B + m_{II}} - w_o - w_\delta - \frac{B}{m_B + m_{II}} \right), \quad (5.32)$$

де F – сила тяги вагона;

w_o – питомий основний опір руху поїзда;

w_δ – питомий додатковий опір руху поїзда;

m_B – маса вагона;

m_{II} – маса завантаження вагона пасажирями;

B – сила гальмування вагона;

K – коефіцієнт, що враховує розмірність.

Рівняння руху потяга можна вирішити за допомогою різних чисельних методів. У цій моделі для вирішення рівняння руху потяга використовується метод Ейлера.

Під час розв'язування рівняння руху потяга (5.32) швидкість потяга на кожному кроці інтегрування визначаємо за такою формулою:

$$V_j = \frac{K(f - w_o - i - w_{kp} - b)\Delta S}{V_{j-1}} + V_{j-1}, \quad (5.33)$$

де V_j – швидкість потяга на j -ом кроці інтеграції;

V_{j-1} – швидкість потяга на $(j-1)$ -му кроці інтеграції;

ΔS – крок інтеграції по дорозі.

Питома сила опору руху:

$$w = w_o + w_\delta, \quad (5.34)$$

де w_o – основний питомий опір руху потяга, обумовлений тертям в підшипниках, опором, що виникає під час взаємодії рухомого

складу і шляху, опором повітряного середовища;

w_{∂} – додатковий опір руху, який визначається опором від ухилів і кривих.

Зазвичай основний питомий опір руху потяга метрополітену в режимі тяги визначають за такою формулою

$$w_{oT} = 1,1 + 0,0092 \frac{S_{EP}}{2(m_{\epsilon} + m_{II})n_{\epsilon}} V^2, \quad (5.35)$$

де m_{ϵ} – маса тари вагона, яка дорівнює 33,5 т;

m_{II} – маса завантаження вагона пасажирами;

n_{ϵ} – кількість вагонів у потязі – 7;

S_{EP} – площа еквівалентної поверхні складу;

S_{EP} – для складу з семи вагонів дорівнює 47 м².

Основний питомий опір руху потяга в режимі вибігу (неробочий хід) визначають за такою формулою:

$$w_{ox} = 1 + \frac{26}{2(m_{\epsilon} + m_{II})} + 0,01V + 0,0092 \frac{S_{EP} V^2}{2(m_{\epsilon} + m_{II})n_{\epsilon}}. \quad (5.36)$$

Додатковий питомий опір руху поїзда дорівнює сумі опорів від ухилу w_y і кривих w_k :

$$w_{\partial} = w_y + w_{kp}. \quad (5.37)$$

Питомий опір від ухилу дорівнює величині ухилу i :

$$w_y = i. \quad (5.38)$$

Опір від кривих

$$w_{kp} = \frac{630}{R_{kp}}, \quad (5.39)$$

де R_{kp} – радіус кривої.

Величиною кроку інтеграції ΔS обумовлюється час розрахування і точність моделювання. Зі зменшенням кроку інтеграції збільшується точність і час розрахування. Крок інтеграції в режимі вибігу можна обирати більшим, ніж у режимі тяги. Крок інтегрування в режимі тяги потрібно обирати в діапазоні 1–5 м, в режимі вибігу – 1–10 м.

Пройдений шлях визначають, як

$$S_j = S_{j-1} + \Delta S, \quad (5.40)$$

де S_j, S_{j-1} – пройдений потягом шлях відповідно до кінця j -го і $(j-1)$ -го кроків інтегрування.

Під час моделювання руху потяг вважається матеріальною точкою з масою, зосередженою в центрі поїзда [50].

Час руху потяга обчислюється за середньою швидкістю руху на кроці інтегрування V_{cp} :

$$T_j = T_{j-1} + \Delta T_j = T_{j-1} + \frac{\Delta S}{V_{cp}} = T_{j-1} + \frac{\Delta S}{0.5(V_j + V_{j+1})}, \quad (5.41)$$

де $T_j, T_{j-1}, \Delta T_j$ – час ходу на j -ому кроці інтегрування.

Витрати електроенергії вагона на тягу потяга обчислюється за формулою:

$$A_j = A_{j-1} + 2UI_{\partial j}\Delta T, \quad (5.42)$$

де $I_{\partial j}$ – струм двигуна на j -ом кроці інтегрування.

Моделювання руху потяга в режимі тяги й вибігу здійснюється шляхом розв'язування рівняння руху потяга. У режимі тяги $F > 0, B = 0$; у режимі вибігу $F = 0, B = 0$.

$$V \geq V_H = \sqrt{2a_1 S_{oc}}, \quad (5.43)$$

де a_1 – задане уповільнення потяга в режимі прицільного гальмування під час зупинки на станції;

V_H – швидкість потяга на початку гальмування;

S_{oc} – шлях, до кінця перегону, що залишився:

$$S_{oc} = S_{\Pi} - S, \quad (5.44)$$

де S_{Π} – довжина перегону;

S – поточна координата поїзда.

Час руху в режимі гальмування

$$T_T = \frac{V_H}{a_1}, \quad (5.45)$$

На перегонах застосовується пригальмовування для зниження швидкості перед обмеженням швидкості. Швидкість початку гальмування при обмеженнях

$$V_H = \sqrt{2a_2 S_{OC} + V_O^2}, \quad (5.46)$$

де a_2 – уповільнення потяга під час пригальмовування перед обмеженнями швидкості;

S_{OC} – шлях, до обмеження швидкості, що залишився;

V_O – швидкість обмеження

Час руху потяга в режимі пригальмовування перед обмеженням швидкості

$$T_T = \frac{V_H - V_O}{a_2}. \quad (5.47)$$

Модель уможлиблює розрахування траєкторії руху потяга для перегонів з одним і двома ввімкненими тяговими двигунів. Для перегонів з одним увімкненням тягових двигунів розраховують п'ять траєкторій руху для заданих годин ходу по перегону $T_{x1}^3, T_{x2}^3, T_{x3}^3, T_{x4}^3, T_{x5}^3$, що кратні 5 с. Перша траєкторія руху потяга розраховується для мінімального часу руху $T_{x\min}$, якщо відімкнення тягових двигунів здійснюється в момент, коли швидкість поїзда досягає допустимої швидкості V_O .

Якщо $T_{x\min}$ не кратне 5 с, то обирають перший заданий час-хід, який буде кратним 5 с, $T_x^3 \geq T_{x\min}$ і для цього часу розраховують траєкторію руху. Кожен подальший заданий час руху по перегону збільшують на 5 с, тобто $T_{x2}^3 = T_{x1}^3 + 5c$, $T_{x3}^3 = T_{x2}^3 + 5c$ тощо.

Заданий час руху потяга по перегону досягається за допомогою вибору координати вимкнення тягових двигунів $S_{61}, S_{62}, S_{63}, S_{64}, S_{65}$. Якщо отриманий час руху по перегону не дорівнює T_x^3 з точністю до 1 с, то змінюється місце вимкнення тягових двигунів на один крок інтегрування в той або інший бік залежно від знака розузгодження часів руху і знову моделюється рух поїзда до виконання умови

$$|T_x^3 - T_x| \leq 1, \text{ с} \quad (5.48)$$

На перегонах з двома ввімкненими тяговими двигунами перше вимкнення двигунів проводиться у фіксованій (заданій) координаті $S_{БКЛ1}$, друге – у заданій координаті $S_{БКЛ2}$, а умови заданого часу руху – за таким самим алгоритмом, як і на перегонах із одним увімкненням тягових двигунів шляхом підбору координати $S_{ВИКЛ2}$.

Розглянемо модель регулятора часу ходу електропоїзда по перегонах.

Модель регулятора часу ходу уможлиблює дослідження п'яти законів регулювання часу ходу одноконтурних систем автоведення електропоїздів:

– закон керування по шляху руху потяга в режимі тяги S залежно від

- часу ходу по перегону $T_x - S_m(T_x)$;
- закон керування за часом руху потяга в режимі тяги T_m залежно від часу ходу по перегону $T_x - T_m(T_x)$;
 - закон керування за швидкістю потяга у момент вимкнення тягових двигунів $V_{\text{вм}}$ залежно від часу ходу по перегону $T_x - V_{\text{вм}}(T_x)$;
 - закон керування по середній швидкості потяга в режимі тяги V_c залежно від часу ходу по перегону $T_x - V_c(T_x)$;
 - закон керування за часом додаткового руху потяга від контрольної точки в режимі тяги $T_{\text{дм}}$ залежно від часу ходу поїзда, який залишився, від контрольної точки до кінця перегону $T_{\text{ос}} - T_{\text{дм}}(T_{\text{ос}})$.

Залежності $S_m^n(T_x)$, $T_m^n(T_x)$, $V_{\text{вм}}^n(T_x)$, $V_c^n(T_x)$, $T_{\text{дм}}^n(T_x)$, розраховані для середнього завантаження вагона ($m_p = 9$ т), середньої напруги на струмоприймачі ($U = 800$ В), коефіцієнта урахування основного опору руху поїзда ($\kappa_0 = 1$) називають програмними. Для отримання вказаних програмних залежностей розраховуються траєкторії руху поїзда для п'яти заданих годин ходу по перегону (рис. 5.7).

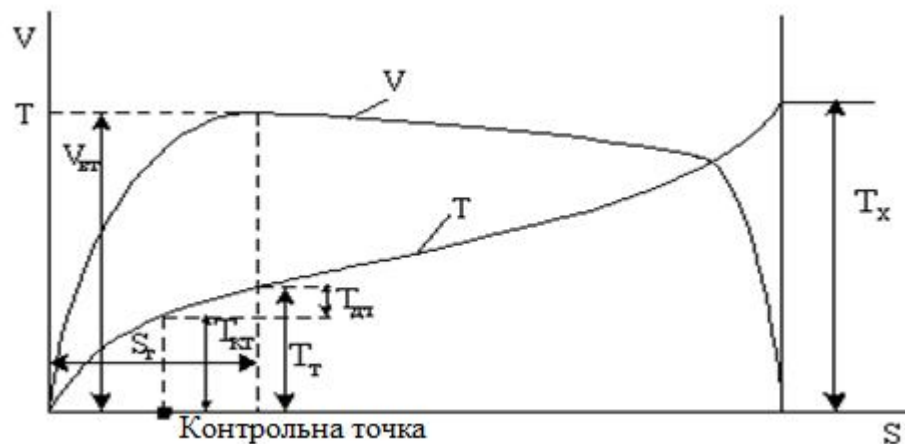


Рисунок 5.7 – Траєкторія руху поїзда по перегону

Середня швидкість на перегоні з одним увімкненням тягових двигунів визначається так:

$$V_c = \frac{S_m}{T_m} . \quad (5.49)$$

На перегонах з двома ввімкненими тяговими двигунами:

$$V_c = \frac{(S_{m1} + S_{m2})}{(T_{m1} + T_{m2})} , \quad (5.50)$$

де S_{m1}, S_{m2} – шлях потяга в режимі тяги при першому і другому ввімкненнях тягових двигунів відповідно;

T_{m1}, T_{m2} – час руху потяга в режимі тяги, відповідно при першому і другому ввімкненнях тягових двигунів відповідно.

Для РЧХ контрольна точка додаткового часу руху потяга в режимі тяги, згідно із законом $T_{\partial m}(T_{oc})$, визначається як різниця всього часу руху потяга із ввімкненими тяговими двигунами T_m і часу руху до контрольної точки $T_{\kappa m}$:

$$T_{\partial m} = T_m - T_{\kappa m} \quad (5.51)$$

Час руху потяга, що залишився, від контрольної точки до кінця перегону визначається як різниця між часом ходу потяга по перегону T_x і часом ходу до контрольної точки:

$$T_{oc} = T_x - T_{\kappa m} \quad (5.52)$$

Модель дослідження якості регуляторів часу ходу працює за таким алгоритмом. Спочатку розраховуються траєкторії руху потягу для п'яти заданих годин руху, кратних 5 с, при програмних параметрах руху потяга. Далі здійснюється кусково-лінійна апроксимація програмної залежності одного з досліджуваних законів РЧХ, наприклад $S_m^n(T_x)$. Після цього задаються досліджувані параметри потяга і знову запускається модель руху потяга в режимі тяги. За залежністю, наприклад $S_m^n(T_x)$ визначається програмне значення S_m^n для заданих годин руху по перегону. У момент, коли поточне значення параметра досліджуваного закону управління буде дорівнювати програмному, вимикаються тягові двигуни і моделюється процес руху потягу на вибігу й гальмуванні, визначається фактичний час. Після зупинки поїзда визначаються показники якості досліджуваного регулятора часу ходу.

У роботі замість емпіричних формул (5.32), (5.33) для розрахування основного питомого опору руху потяга використовувалися уточнені формули (3.19), (3.20) для режиму тяги й режиму вибігу відповідно. Розрахування за допомогою цих формул і застосування їх у розробленому методі уможливають врахування впливу вентиляційних потоків, втрат на місцевих гідравлічних опертях по всій довжині активної ділянки, нестационарність руху повітряного середовища. Перелічені показники істотно впливають на якість програм автоведення поїзда при заданому часі ходу, який, зі свого боку, визначається за витратами енергії на тягу поїздів, кількістю перемикачів позицій керування для потягів із дискретним керуванням силою тяги і кількістю перемикачів режимів тяги для потягів метрополітену.

5.5 Практичні рекомендації щодо зменшення негативного впливу обурень повітряного середовища під час побудови алгоритмів для поїздів у тунелі

Дослідимо, як впливає коефіцієнт урахування основного опору руху поїзда на побудову оптимальних алгоритмів для поїздів метрополітену, а також на витрату енергії. За однакових вхідних на модель і реальний об'єкт на виході маємо різні результати (що точніше модель описує реальний об'єкт, то ближче значення її вихідних параметрів до вихідних параметрів реального об'єкта).

Нехай параметри руху будуть такими:

час ходу – 155 с;

маса завантаження вагона пасажирями – 9 т; напруга на контактній рейці – 800 В;

детермінована модель: коефіцієнт урахування основного опору – 1 (крива 1);

стохастична модель: коефіцієнт урахування основного опору – 1,2 (крива 2).

Таблиця 5.5 – Початкові дані перегону з двома ввімкненими тяговими двигунами

Довжина перегону, м	Довжини елементів профілю, м	Ухили, ‰	Координата першого вимкнення тягових двигунів, м	Координата другого вимкнення тягових двигунів, м
2480	444	–3	400	1000
	293	3		
	614	30		
	98	–5		
	347	5		
	684	0		

Результати перевірки стійкості моделі при різних значеннях коефіцієнта урахування основного опору подано в таблиці 5.6 ($U = 800$ В; $m = 9$ т), а на рисунку 5.8 відображено траєкторії і параметри руху поїзда для перегону з двома ввімкненнями тяговими двигунами при змінюванні коефіцієнта урахування основного опору.

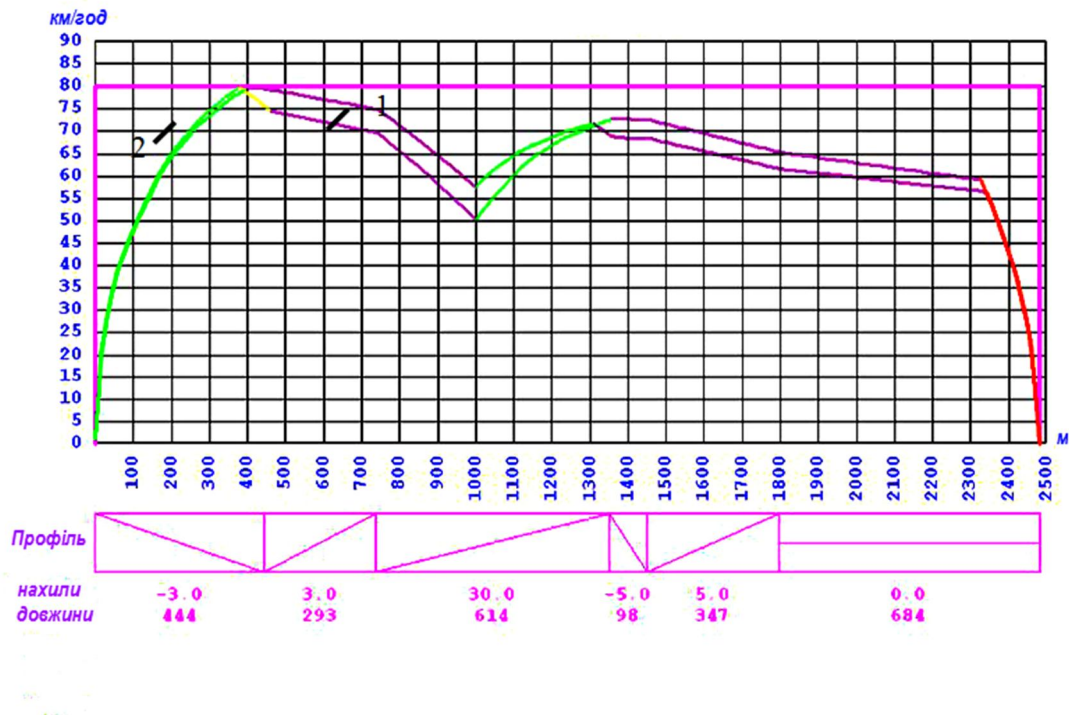


Рисунок 5.8 – Траєкторії і параметри руху поїзда для перегону з двома ввімкненнями тяговими двигунами при змінюванні коефіцієнта урахування основного опору

Таблиця 5.6. – Показник стійкості моделі при різних значеннях коефіцієнта урахування основного опору

Показники стійкості моделі	Коефіцієнт урахування основного опору				
	$k = 0,8$	$k = 0,9$	$k = 1$	$k = 1,1$	$k = 1,2$
Заданий час ходу, с	150	150	150	150	150
Фактичний час ходу, с	149,09	149,06	149,52	149,25	149,00

За отриманими результатами зрозуміло, що модель стійка, оскільки в разі змінювання основного опору заданий час руху виконується з точністю до 1 с.

Перевіримо адекватність моделі. Перевірка проводиться за середніми значеннями параметрів.

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V_n ; \quad \bar{V}^M = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V_n^M ; \quad (5.53)$$

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N T_n ; \quad \bar{T}^M = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N T_n^M ; \quad (5.54)$$

$$E_1 = \bar{V}^M - \bar{V} ; \quad (5.55)$$

$$E_2 = \bar{T}^M - \bar{T} ; \quad (5.56)$$

$$E_3 = A^M - A ; \quad (5.57)$$

де V_n – швидкість потяга в n -ій точці траєкторії;

T_i – час поїзда в n -ій точці траєкторії;

$\bar{V}, \bar{T}, \bar{V}^M, \bar{T}^M$ – середні значення швидкості й часу в системі і на моделі відповідно;

E_1, E_2, E_3 – оцінки адекватності.

Кількість порівнюваних точок (N) дорівнює десяти.

Розрахування проводиться при детермінованій моделі на перегоні з одним увімкненням тягових двигунів ($U = 800$ В; $m = 9$ т).

Значення параметрів в обраних точках траєкторії подано в таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 – Значення параметрів в обраних точках траєкторії

Координата, м	Система		Модель	
	Швидкість, км/ГОД	Час, с	Швидкість, км/ГОД	Час, с
100	48,6	14,1	47,3	12,7
200	63,4	19,9	64,6	19,4
300	73,3	25,4	74,1	24,8
400	79,7	30,1	80	29,3
500	78,6	34,6	74,3	34
600	77	39,3	72,6	39,4
700	75,6	43,5	71,2	43,9
800	71,1	48,9	66,7	49
900	64,5	54,2	59	55,3
1000	57,4	60,1	52	61,2
Σ	690,2	370,1	661,8	369

Адекватність моделі оцінюється за такими параметрами:

- 1) швидкість потяга в обраних для порівняння точках;
- 2) час ходу поїзда в обраних для порівняння точках;
- 3) витрати електроенергії на перегоні.

Адекватність за швидкістю оцінюється так:

$$\bar{V} = \frac{1}{10} \cdot 690,2 = 69,02 \frac{\text{км}}{\text{ч}} ;$$

$$\bar{V}^M = \frac{1}{10} \cdot 661,8 = 66,18 \frac{\text{км}}{\text{ч}};$$

$$E_1 = \bar{V}^M - \bar{V} = 66,18 - 69,02 = -2,84 \frac{\text{км}}{\text{ч}}.$$

Адекватність за часом:

$$\bar{T} = \frac{1}{10} \cdot 370,1 = 37,01 \text{ с};$$

$$\bar{T}^M = \frac{1}{10} \cdot 369 = 36,9 \text{ с};$$

$$E_2 = \bar{T}^M - \bar{T} = 36,9 - 37,01 = -0,11 \text{ с}.$$

Адекватність за витратами електроенергії:

$$A^M = 5,43 \text{ кВт/ч}; \quad A = 4,91 \text{ кВт/год};$$

$$E_3 = 4,91 - 5,43 = -0,52 \text{ кВт/год}.$$

За отриманими результатами зрозуміло, що для десяти точок значення параметрів на моделі менші за фактичні значення:

- середнє значення швидкості – на 2,84 км/год;
- середнє значення часу – на 0,11 с;
- витрати електроенергії – на 0,52 кВт/год.

На рисунку 5.10 подано результати розрахування витрат енергії на проходження місцевого гідравлічного опору.

Таким чином, нестационарність руху циркуляційних потоків враховується через коефіцієнти тертя повітряного середовища. Величини зазначених коефіцієнтів необхідно визначати (на відміну від раніше використовуваних методів [4,5]) для кожного перегону метрополітену окремо.

Розроблений метод вибору оптимальних керувальних параметрів для регулювання швидкості і сили тяги (гальмування) в різних режимах уможливорює зниження витрат енергії. Витрати енергії зменшаться на 0,008 кВт/ч, що місцевий гідравлічний опір зменшиться на одну одиницю. Пропускна здатність станцій метрополітену для метропоїздів із вагонів моделі 81.717/714 становить 47 поїздів/год, економія – 0,376 кВт/ч на годину (рис. 5.10)

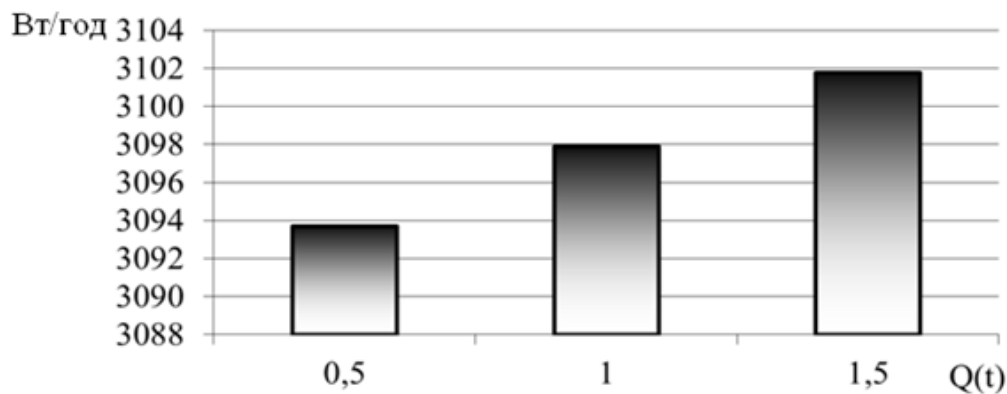


Рисунок 5.10 – Витрата енергії на проходження місцевого гідравлічного опору

Удосконалений метод тягового розрахування дає змогу визначити вплив змінювання геометрії тунелю на витрати електричної енергії. Обтічна форма входу у вентиляційну сполучину на перегоні «Проспект Гагаріна» – «Спортивна» Харківського метрополітену уможлиблює зменшення річних витрат електричної енергії на 182,5 кВт/год для одного поїзда.

Таким чином, розрахунки, виконані за допомогою наведених вище формул, доводять, що в умовах метрополітену можна реалізувати заходи, які істотно зменшать питомий опір руху вагонів і забезпечать значне зниження витрат електроенергії на тягу поїздів.

ВИСНОВКИ

У роботі теоретично узагальнено й вирішено наукове завдання удосконалення методу тягового розрахування рухомого складу, яке полягає в подальшому вдосконаленні методу визначення повітряного опору поїздів у тунелі з урахуванням неоднорідності повітряного середовища, моделювання процесів взаємодії транспортних засобів з повітряним середовищем з метою гарантування безпеки праці.

Практичне значення роботи полягає в розробці науково обґрунтованих рекомендацій щодо вибору оптимальних програм руху рухомого складу, раціональних геометричних параметрів тунелів і станцій метро з мінімальними втратами енергії на місцевих гідравлічних опертях, які дозволять зменшення витрат електроенергії та підвищення техніко-економічних показників рухомого складу, забезпечують необхідні санітарно-гігієнічні умови, пожежну безпеку рухомого складу. Застосування аварійного режиму має супроводжуватися виконанням низки організаційно-технічних вимог:

- додатково підвищити ефективність аварійних режимів можна шляхом застосування вентиляційних перемичок, що встановлюються пожежними після виникнення пожежі;
- доцільно встановлювати повітряні завіси, що створюються вентилятором зі щільним роздавальним пристроєм;
- для попередження надходження нагрітих продуктів горіння в ескалаторні ходки на станціях глибокого закладення необхідно обладнати протидимні бар'єри входів на ескалатори і ввімкнути на витяжку найближчі до станції вентиляційні установки;
- у тих випадках, коли робота вентиляційних установок метрополітену не забезпечує стабільний спадний рух повітря по ескалаторним ходкам, для підвищення стійкості необхідно передбачати використання порожніх складів.

Під час проведення досліджень отримано такі результати:

1. На підставі огляду й аналізу методів тягового розрахування руху поїздів доведено, що наявні методи не враховують впливу неоднорідності повітряного середовища на повітряний опір рухомого складу в тунелі.
2. На прикладі Харківського метрополітену із застосуванням чисельного моделювання проведено дослідження впливу неоднорідності повітряного середовища на сили тяги рухомого складу в тунелі. Визначено базові закономірності змінювання повітряного опору руху рухомого складу залежно від геометричних розмірів тунелів при різних інтенсивностях руху поїздів та режимах роботи вентиляційних систем, які свідчать про істотність впливу неоднорідності повітряного середовища на повітряний опір руху рухомого складу в тунелі вздовж перегону.
3. Удосконалено метод тягового розрахування поїздів у тунелі, який, на відміну від відомих методів враховує вплив збурень повітряного середовища у тунелі на основний опір рухомого складу та дає змогу визначити

енергетичні характеристики поїзда вздовж перегону.

4. Достовірність удосконаленого методу тягових розрахунків забезпечується задовільним узгодженням розрахункових даних автора з експериментальними даними і теоретичними положеннями інших авторів.

5. Розроблено метод оптимізації програм руху поїздів у тунелі, який враховує вплив неоднорідності повітряного середовища, що створюється внаслідок змінювання геометричних форм тунелів, нерівномірності вентиляційних потоків і руху рухомого складу.

6. Удосконалений метод тягового розрахування дає змогу оцінити вплив змінювання геометрії тунелю на витрати електричної енергії: більш обтічна форма входу в вентиляційну сполучину на перегоні «Проспект Гагаріна» – «Спортивна» Харківського метрополітену уможливило зменшення річних витрат електричної енергії на 182,5 кВт/год для одного поїзда.

Отримані наукові результати можуть бути використані науково-дослідними підприємствами та промисловими організаціями під час розроблення оптимальних програм автоведення електропоїздів, модернізації наявних електропоїздів, рекомендацій щодо вибору раціональних геометричних форм тунелів, підвищення енергоефективності перевезень шляхом поєднання програм руху поїздів із графіками роботи вентиляційних установок, підвищення безпеки праці працівників метрополітену, удосконалення методики розрахування параметрів і тягових розрахунків поїздів, підвищення техніко-економічних характеристик вагонів та забезпечення необхідного рівня енергозбереження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Исаев Л. А. В конце тоннеля – свет / Л. А. Исаев. – Харьков : ПРАПОР, 2000. – 285 с.
2. Цодиков В. Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов. / В. Я. Цодиков. – Москва : Недра, 1975. – 313 с.
3. Цодиков В. Я. Взаимодействие системы тоннельной вентиляции и поршневого эффекта движущихся в метрополитене поездов / В. Я. Цодиков. – Москва : Транспортное строительство, 1974. – №5, С. 47–49.
4. Абрамович Г. Н. К расчету воздушного сопротивления поезда на открытой трассе и в тоннеле / Г. Н. Абрамович // Труды ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского. – 1939. – Вып. 400. – С. 32.
5. Радченко В. Д. Сопротивление движению вагонов метрополитена. / В. Д. Радченко. – Москва : Недра, 1957. – 70 с.
6. Пат. 65252 Україна, МПК G01M 9/00. Спосіб розрахунку аеродинамічних характеристик системи «тунель – поїзд» у метрополітені / С. А. Грязнова, М. В. Хворост, О. В. Коломійцев; заявлено 14.06.2011; опубл. 25.11.2011, Бюл. № 22. – 4 с.
7. Организация движения поездов и работа станций метрополитена / А. С. Бакулин, В. А. Пронин, Е. А. Федоров и др. – Москва : Транспорт, 1981. – 229 с.
8. Арбузов Г. В. Вентиляция тоннелей метрополитенов / Г. В. Арбузов. – Москва : Изд-во ГТЖ, 1950. – 89 с.
9. СНиП II-40-80. Метрополитены. Утверждено Госстроем СССР. – Москва : Стройиздат, 1981. № 2., 73 с.
10. Юшковский Э. М. Исследование вентиляции метрополитена глубокого заложения при интенсивном движении поездов / Э. М. Юшковский. – Ленинград, 1979.
11. Казаков В. С. О сезонном регулировании воздухообмена в метрополитенах / В. С. Казаков – Москва : ЦНИИС, 1987. – 35 с.
12. Беляцкий В. П. Противопожарная защита и тушение пожаров подземных сооружений / В. П. Беляцкий, В.Ф. Бондарев. – Москва : ВНИИПО, 1983. – 32 с.
13. Борисов П. Метрополітен: це справді безпечно? Пожежна безпека / П. Борисов, Д. Чертов. – Москва : Пожежна безпека, 1996. – 40 с.
14. Беляцкий В. П. Расчет системы тоннельной вентиляции для дымоудаления при пожаре на станции : сб. науч. тр. / В. П. Беляцкий, С. Г. Ефимов. – Москва : ВНИИПО МВД РФ, 1992. – 31с.
15. Рыжов А. М. Дифференциальное моделирование динамики пожаров и распространения их опасных факторов в помещениях / Пожаровзрывобезопасность. – Москва, 1994. – т. 3. – № 4. – С. 21–34.
16. Формирование опасных факторов пожара при горении подвижного состава в тоннеле метрополитена. Методологические проблемы обеспечения пожарной безопасности: [сб. научн. тр.] / В. С. Махин, В. С. Иличкин, Ф. В. Красников, И. Г. Бакинов. – ВНИИПО МВД СССР, 1991. – 118 с.
17. Косар А. М. Розробка метода і технічних засобів забезпечення безпеки людей при пожежах у метрополітені / А. М. Косар. – Макіївка, 2002.
18. Правила пожежної безпеки в метрополітенах. – Київ : Пожінформтехніка, 2000. – 112 с.

19. Разработать режимы работы системы тоннельной вентиляции Киевского метрополитена на случаи пожаров и задымлений : Отчет по НИР. – Донецк : НИИГД, 1998. – 74 с.
20. Разработать аварийные режимы работы системы тоннельной вентиляции для случаев пожара на станциях и перегонах линий Киевского метрополитена : Отчетная справка о НИР. – Ленинград: ЛФ ВНИИПО, 1991. – 25 с.
21. Розробити аварійні режими вентиляції Салтівської лінії Харківського метрополітену на випадок пожеж та інформаційне забезпечення вводу у дію аварійної вентиляції : Отчет о НИР / НИИГД, Донецк, 2001. – 535 с.
22. Fukuchi G. Drag of the train the Tunnel // Quartely Report, 1964. – 5. – №2. – P. 15–23.
23. Hara T. Aerodynamic force acting a high speed train at tunnel entrance // Quartely Report, 1961. – 2. - №2. – P. 35–41.
24. Андросюк В.Н. Система воздушных потоков в метрополитенах, ее роль в предупреждении и ликвидации последствий катастроф. // Сборник обзорной информации «Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях». – Москва, 2002. - Вып. № 5. – С. 84–89.
25. Романенко Г.А. Исследования по аэродинамике скоростных поездов // Научн. тр. ин-та механики МГУ. – 1970. – №4. – С. 51 – 61.
26. Сюзюмова Е. И. Сравнительные исследования воздушного сопротивления пассажирских поездов / Е. И. Сюзюмова, Г. А. Романенко // Совершенствование процессов теплообмена и аэродинамики электроподвижного состава. [Тр. Всесоюз. н.-и ин-та ж.-д. транс. – Вып. 539]. – Москва, 1979. – С. 97 – 106.
27. Кравец В. В. Аэродинамика высокоскоростных поездов (Обзор). Часть 1 / В. В. Кравец, Е. В. Кравец. // Залізничний транспорт України , 2005, № 2. – 57 с.
28. Кравец В. В. Аэродинамика высокоскоростных поездов (Обзор). Часть 2 / В. В. Кравец, Е. В. Кравец //Залізничний транспорт України – 2005, № 3, 52 с.
29. Беллман Р. Прикладные задачи динамического программирования / Р. Беллман, С. М. Дрейфус. – Москва : Наука, 1965. – 450 с.
30. Вентцель Е. С. Элементы динамического программирования. / Е. С. Вентцель. – Москва : Главная редакция физико-математической литературы. 1964. — 176 с.
31. Ерофеев Е. В. Анализ систем управления движением поездов с помощью имитационного моделирования. // Proceedings of The 3-th International Scientific Conference of Railways Experts, Yugoslavia, Vrnjacka Banja, 1996. – С. 367–369.
32. Ерофеев Е. В. Модели движения поездов // Proceedings of The 6-th International Scientific Conference of Railways Experts, Yugoslavia, Vrnjacka Banja, 1999. – С. 77–79.
33. Ерофеев Е. В. Способы управления временем хода по перегону в системах автоведения поездов метрополитена / Е. В. Ерофеев. – Москва : Вестник ВНИИЖТ, 1980, №5. – С. 12–14.
34. Денисов С. В. О коэффициенте трения в нестационарных течениях / С. В. Денисов. //Инж. физ. ж.,1970, т.18, №1.

35. Марков С. Б. Экспериментальное исследование скоростной структуры и гидравлических сопротивлений в неустановившихся напорных турбулентных потоках / С. Б. Марков. // Механика жидкости и газа – Москва, 1973. – № 2. – С. 65.
36. Изучение явления «дутья» на Харьковском метрополитене с выдачей рекомендаций по его уменьшению : отчет о НИР : в 2-х частях / ХИИЖТ Харьков, 1980.
37. Розенфельд В. Е. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. И. Исаев, Н. Н. Сидоров. – Москва : Транспорт, 1983. – 328 с.
38. Гафт М. Г. Принятие решений при многих критериях / М. Г. Гафт. – Москва: Знание, 1979. – 64 с.
39. Подвижной состав и тяга поездов / Под ред. В. В. Деева, Н. А. Фуфанского. – Москва : Транспорт, 1979. – 367 с.
40. Баранов Л. А. Исследование процесса регулирования времени хода в системе автоматического ведения поезда на базе микроЭВМ / Л. А. Баранов, Я. М. Головичер, И. А. Яснис – Тр. МИИТ, 1981. – Вып. 694, – С. 51–57.
41. Баранов Л. А. Принципы построения систем автоведения поездов на базе микроЭВМ / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев – Тр. МИИТ, 1978. – Вып. 612. – С. 3–11.
42. Коган Ю. Л., Современные системы управления движением на базе микропроцессоров и микроЭВМ, применяемые за рубежом / Ю. Л. Коган, В. М. Малинов // Железнодорожный транспорт за рубежом : Экспресс-информация. – ЦНИИТЭИ МПС, серия 3, вып. 1 – Москва, 1981. – С. 5–22.).
43. Демченко О. Ф. Розробка засобів ідентифікації електропоїздів метрополітену / О. Ф. Демченко. – Харків, 1998.
44. Где зарыты резервы метрополитена / Журнал «ПиКАД: Промышленные измерения, контроль, автоматизация, диагностика», 2005. – Вып. 4, С. 26–32.
45. Мнацаканов В.А. Предельные возможности метрополитена как транспортной системы. / В.А. Мнацаканов // Метро и тоннели, 2002 . – №3. – С. 1-9.
46. Лондонский метрополитен / International Railway Journal, Великобритания, 1989. - № 10, 61–62 с.
47. Первая линия метрополитена Лондона с автоматическим управлением движением / Городской транспорт: ЭИ ВИНТИ, 1976. – №42, реф. 265 с. 1-3.113; Перспективы развития метрополитена Дели /Железные дороги мира, 2008, №2. – 28-29 с.
48. Подготовка метрополитена Берлина к работе без машинистов / ВИНТИ. Городской транспорт, 1994. – №12. – С. 18.
49. Поезда третьего поколения серии «С» метрополитена Мюнхена // Железные дороги мира, 2005. – №11. – С. 33–44.
50. Сидоренко В.Г. Моделирование в системе автоматизированного диспетчерского управления движением поездов метрополитена / В. Г. Сидоренко // Материалы X международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем». Ч. 2. – Москва : РГТУ, 2002. – С. 161–164.
51. Калиничев В. П. Повышение эффективности метрополитенов / В. П. Калиничев. – Железнодорожный транспорт, 1984. – № 6. – С. 43–48.

Наукове видання

**ХВОРОСТ Микола Васильович
КАЛКАМАНОВ Салим Аюпович
ГРЯЗНОВА Світлана Аркадіївна**

**МОДЕЛІ ВЗАЄМОДІЇ РУХОМОГО СКЛАДУ
МЕТРОПОЛІТЕНУ З ПОВІТРЯНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ
ТА БЕЗПЕКА НА ТРАНСПОРТІ**

МОНОГРАФІЯ

Відповідальний за випуск *М. В. Хворост*
Редактор *О. А. Норик*
Комп'ютерне верстання *С. А. Грязнова*
Дизайн обкладинки *Т. А. Лазуренко*

Підп. до друку 05.09.2016 р.
Друк на ризографі
Зам. №

Формат 60×84/16
Ум. друк. арк. 5,1
Тираж 300 пр.

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Революції, 12, Харків, 61002
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК №4705 від 28.03.2014 р.